

Lacktrocknungsvorgänge auf dreidimensionalen Geometrien - Simulation und Experiment -

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Felix Brinckmann

aus Bayreuth

Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan
Mitberichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
Tag der Einreichung	04.07.2011
Tag der mündlichen Prüfung	19.10.2011

Darmstadt 2011
D17

Für Uschi

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Thermodynamik an der Technischen Universität Darmstadt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan, der als Leiter des Instituts das Forschungsthema betreut und mir technisch sowie finanziell die Möglichkeit zur Promotion eröffnet hat. Für Fragen zur meiner Arbeit sowie zu hochschulpolitischen Themen stand er stets als Ansprechpartner zur Verfügung und hat mir außerdem die Möglichkeit geboten, mehrfach an Forschungsflügen in Schwerelosigkeit teilzunehmen.

Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam.

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Daimler AG gelten mein Dank für die finanzielle Unterstützung der Arbeit. Für die regen Diskussionen und die gute Unterstützung bedanke ich mich bei Dipl.phys.oec. Stephan Hecht, Dr.-Ing. Thomas Lehnhäuser, Dipl.-Ing. Ralf Löffler von der Firma ANSYS Germany GmbH. Außerdem bedanke ich mich bei allen Projektpartnern im SiLat-Projekt, insbesondere den Mitarbeitern des Fraunhofer IPA und dem IFF der Universität Stuttgart sowie an der FH Esslingen und bei der Volkswagen AG.

Allen Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt unter der Leitung von Roland Berntheisel möchte ich für die langjährige, sehr gute Zusammenarbeit danken. Die Diskussionen und Ratschläge zur Konstruktion der Versuchsanlage waren für mich äußerst wertvoll.

Durch die freundschaftliche und diskussionsoffene Arbeitskultur haben meine Kollegen am Institut zum Gelingen der Arbeit sehr beigetragen. Besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Nils Schweizer, Dipl.-Ing. Karsten Löffler und Dipl.-Ing. Christian Kunkelmann, die mich mit Rat und Tat an der Versuchsanlage oder theoretischen Fragestellungen unterstützt haben.

Besonders möchte ich mich auch bei meinem Studienarbeiter und meiner wissenschaftlichen Hilfskraft Ilya Shevchuk für die langjährige Unterstützung und wertvollen Diskussionen bedanken. Dank gilt auch Markus Sauer, der mich durch seine Bachelor-Thesis und danach als wissenschaftliche Hilfskraft unterstützt hat. Ebenso danke ich Felix Crößmann, Sebastian Schmidt, Matthias Pistner und Simon Ströder, die durch ihre Studienarbeit bzw. Bachelor-Thesis einen wertvollen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Meinem Vater, Dr. Enno Brinckmann, sowie meiner Mutter, Brigitte Berg, danke ich für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Mein abschließender Dank gilt meiner Familie und allen Freunden, die mich während Studium und Promotion begleitet haben.

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den genannten Anregungen und zitierten Quellen, selbständig angefertigt habe.

Darmstadt, Juli 2011

Felix Brinckmann

Kurzfassung

Trocknungsprozesse im industriellen Maßstab sind sehr energieaufwändig und bieten daher ein entsprechendes Energieeinsparpotential. Große Anteile der eingesetzten Energie werden benötigt, um in den Lacken enthaltene Dispersions- und Lösemittel zu verdunsten. Zur Ausschöpfung der Möglichkeiten der Energieeinsparung ist die Vorhersage von Trocknungsprozessen in Form von Simulationen bei der Auslegung neuer Anlagen sowie zur Optimierung bestehender Trocknungsanlagen unbedingt notwendig. Trocknungssimulationen können weiterhin in einer „Digitalen Fabrik“ verwendet werden, um im Produktentwicklungsprozess frühzeitig Engpässe bezüglich des lackiergerechten Designs von Bauteilen zu erkennen. Zur Qualitätssicherung ist es außerdem wünschenswert, die Auswirkungen von Änderungen an der Trocknungsanlage oder Bauteilen auf den Trocknung vorherzusagen. Zur Vorhersage der Trocknung von wasserbasierten Lackschichten wird in dieser Arbeit ein theoretisches Berechnungsmodell vorgeschlagen. Bei der Modellierung der Trocknung wird eine Dispersionstrocknung angenommen. Das Trocknungsmodell berechnet den Stofftransport eines ternären Modelllacksystems eindimensional, senkrecht zur freien Lackoberfläche. Der Wärmestrom in die Lackschicht sowie die Verdampfungsenthalpien der Dispersionsmittel werden berücksichtigt. Um die Trocknung von Lackschichten auf dreidimensionalen Oberflächengeometrien auch unter komplexen Strömungsbedingungen vorhersagen zu können, wird das Trocknungsmodell über benutzerdefinierte Schnittstellen an den kommerziellen CFD-Solver FLUENT angebunden.

Ferner wird in dieser Arbeit ein Laborversuchsstand vorgestellt, in dem die Trocknung einer wasserbasierten Lackschicht auf einem Probeblech unter definierten Randbedingungen charakterisiert werden kann. Während der Trocknung werden Masse und Temperatur des Probeblechs sowie der Anteil des organischen Lösemittels in der Abluft erfasst. Umfangreiche experimentelle Messungen bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen sowie Trocknungsparameterstudien bezüglich Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit wurden an dem Versuchsstand vorgenommen.

Zur Verifikation des Trocknungsmodells wurden die durchgeführten Experimente simulativ nachgestellt. Eine sehr gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation konnte nachgewiesen werden.

Zur Demonstration der Funktionsweise des Trocknungsmodells wurden exemplarisch anwendungsnahe Problemstellungen betrachtet. So wurde exemplarisch die Trocknung auf einer Karosserie in einem generischen Durchlauftrockner sowie einer lackierten Flugzeugaußenhaut in einer Halle simuliert. Außerdem wurde das Trocknungsmodell so erweitert, dass die Trocknung von kontinuierlich bewegten Gütern in einem Förderbandtrockner berechnet werden konnte.

Abstract

Industrial scaled drying processes are strongly energy consuming and offer therefore a large energy saving potential. A considerable part of the energy is needed to evaporate dispersants and solvents contained in paint films. To realize the potential of energy savings, the prediction of drying processes in the design of new facilities and the optimization of existing drying plants is essential. In a “digital factory“ drying simulations can be used to identify possible bottlenecks concerning the drying during early steps of the design process. To assure quality, it is also desirable to predict the impact of changes to the drying facilities on the drying process.

In this study, a laboratory test stand is presented to characterize the drying process of a water-based paint layer on a test sample in defined drying conditions. During the drying process, mass and temperature of the test sample and the concentration of organic solvent in the exhaust air is measured. Extensive experimental measurements in different flow conditions and parameter studies on drying air temperature, air speed and humidity were carried out.

To predict the drying of water-based paint layers, a calculation model based on physical properties is proposed. Assuming a dispersive drying process, the model calculates a one-dimensional mass transfer of a ternary model paint system perpendicular to the free coating surface. The heat flow into the paint layer and the evaporation of the dispersants is also considered. To predetermine the drying process of coatings on three-dimensionally shaped geometries under complex flow conditions, the drying model was implemented to the commercial CFD solver FLUENT using user defined functions.

The drying model was verified by comparing the simulation results with experiments. A very good agreement between experiment and simulation was proved.

To demonstrate the operation of the drying model, application-related problems were considered exemplarily. The drying process of a painted car body in a generic continuous dryer and of a coated outer skin of aircraft in a hangar was simulated. Furthermore, the model was extended to calculate a drying process of continuously moving goods in a conveyor dryer.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse	XII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Aufgabenstellung	1
1.2. Grundbegriffe der Filmbildung und Trocknung	4
2. Stand der Forschung	9
2.1. Modellierung der Filmtrocknung	9
2.1.1. Massenstransport und Phasenübergang	10
2.1.2. Filmbildung und Reaktionen	12
2.1.3. Trocknersimulation	12
2.2. Experimente zur Filmtrocknung	13
2.2.1. Integrale Untersuchungen	13
2.2.2. Lokale Untersuchungen	15
3. Experimentelle Untersuchungen	18
3.1. Versuchsaufbau	18
3.2. Messtechnik	21
3.2.1. Temperaturen	21
3.2.2. Luftgeschwindigkeit	21
3.2.3. Luftfeuchtigkeit	24
3.2.4. Lackmasse	24
3.2.5. Organisches Lösemittel in der Abluft	25
3.3. Probengeometrien	25
3.4. Lackapplikation	26
3.5. Versuchsablauf der Aufheizversuche	28
3.6. Versuchsablauf der Trocknungsversuche	28
3.7. Chromatisch-konfokale Abstandsmessungen	29
4. Trocknungsmodellierung	31
4.1. Modellierungsstrategie für den Lackfilm	31
4.2. Stoffwerte	33
4.2.1. Gasphase	34
4.2.2. Lackfilm	35
4.2.3. Substrat und Wände der Messzelle	37
4.3. Erhaltungsgleichungen im Lackfilm	37
4.3.1. Stofftransport	38
4.3.2. Wärmetransport	40
4.3.3. Randbedingungen	40
4.4. Gleichgewichtszustände an der Phasengrenze	40

4.5.	Erhaltungsgleichungen in der Gasphase	42
4.5.1.	Wärme- und Stofftransport	42
4.5.2.	Strahlung	42
4.5.3.	Randbedingungen	44
4.6.	Räumliche Diskretisierung	46
4.6.1.	Diskretisierung des Lackfilms	46
4.6.2.	Diskretisierung des Strömungsgebietes	49
4.6.3.	Diskretisierung des Substrates	51
4.7.	Zeitliche Diskretisierung	52
4.8.	Umsetzung in FLUENT	54
4.9.	Vorgabe der Initial- und Randbedingungen	54
4.10.	Konvergenzkriterien	55
4.11.	Zweischichtlackierung mit idealer Durchmischung	55
4.12.	Zweischichtlackierung ohne Durchmischung	56
5.	Ergebnisse	59
5.1.	Aufheizversuche	59
5.1.1.	Wärmeeintrag in das Probeblech	59
5.1.2.	Temperaturverteilung	60
5.2.	Aufheiz- und Trocknungsvorgang - Simulation und Experiment	63
5.2.1.	Modelllack auf ebenem Blech in Prallanströmung	64
5.2.2.	Modelllack auf ebenem Blech in Parallelanströmung	66
5.2.3.	Modelllack auf Z-Blech in Parallelanströmung	69
5.2.4.	Industrieller Basislack	70
5.2.5.	Industrieller Klarlack	71
5.3.	Trocknungsversuch auf profiliertem Blech	73
5.4.	Numerisches Verhalten des Trocknungsmodells	75
5.4.1.	Diskretisierung in der Grenzschicht	75
5.4.2.	Zeitkonvergenz	76
5.4.3.	Diskretisierung im Lackfilm	77
5.4.4.	Turbulenzmodelle	79
5.4.5.	Simulationsaufwand	81
5.4.6.	Vergleich zum Vorgängermodell	81
5.5.	Simulationsergebnisse bei verschiedenen Start- und Randbedingungen	82
5.5.1.	Einfluss des Substrates	82
5.5.2.	Einfluss der Strahlung	84
5.5.3.	Einfluss der Lackzusammensetzung	86
5.5.4.	Einfluss der Starttemperatur	87
5.5.5.	Zweischichtlackierung mit idealer Durchmischung	88
5.5.6.	Zweischichtlackierung ohne Durchmischung	89
6.	Anwendungen der Trocknersimulation	92
6.1.	Trocknung einer Automobil-Karosserie	92
6.1.1.	Aufheizverhalten an Profilverzweigungen	98
6.1.2.	Aufheizverhalten an Falzen und Verklebungen	99
6.2.	Trocknung einer Flugzeug-Außenhaut	101
6.3.	Trocknung in einem Bandtrockner	106

7. Zusammenfassung und Ausblick	112
Anhang	115
A. Stoffdaten	116
A.1. Gasphase	116
A.1.1. Wasserdampf	116
A.1.2. Butylglykoldampf	117
A.1.3. Trockene Luft	117
A.2. Substrat	118
A.2.1. Stahl	118
A.3. Kanalwand	118
A.3.1. Aluminium	118
A.4. Lackfilm	118
A.4.1. Wasser	118
A.4.2. Butylglykol	119
A.4.3. Polyurethan	120
A.4.4. Diffusionskoeffizienten	120
A.4.5. Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewicht	120
B. CFD-Solver FLUENT	121
C. Struktogramm	122
Literaturverzeichnis	123
Lebenslauf	131

Formelzeichen

Lateinische Großbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
A	—	Konstante
B	m	Breite
$B1 \dots B4$	—	Konstante
\bar{C}_p	$\text{J}/(\text{kmol K})$	spezifische molare Wärmekapazität bei konstantem Druck
C	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$	Strahlungsaustauschkonstante
C_μ	—	Turbulenzkonstante
\mathcal{D}	m^2/s	Binärer Diffusionskoeffizient
D	m^2/s	Effektiver binärer Diffusionskoeffizient
F	—	Einstrahlzahl
I	W/m^2	Strahlungsintensität
L	m	charakteristische Länge
M	kg	Masse
\bar{M}	kg/kmol	Molmasse
\dot{M}	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$	Massenstromdichte
\dot{M}_K	kg/s	konvektiver Massenstrom
$\dot{M}_{Q,i}$	$\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$	volumenbezogener Massenquellterm der Komponente i
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	K/W	Wärmewiderstand
\bar{R}	$\text{J}/(\text{kmol K})$	spezifische molare Gaskonstante
T	K	absolute Temperatur
T_k	K	kritische Temperatur
U	m	Kanalinnenumfang
\bar{V}	m^3/kmol	Molvolumen
\hat{V}	m^3/kg	spezifisches partielles Volumen
X	$\text{g}/\text{kg}_{\text{tr.LU}}$	Beladung trockener Luft
$X(t)$	m	Schichtdicke in Abhängigkeit von der Zeit

Lateinische Kleinbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
a	$1/\text{m}$	Absorptionskoeffizient
a_i	—	Aktivität der Komponente i

b	m	Breite
c	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
c_p	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
d	—	Durchlassgrad, Transmissionsgrad
d_h	m	hydraulischer Durchmesser
d_i	m	Innendurchmesser
f	—	skalare Funktion
g	—	skalarer Faktor
g	m/s ²	Fallbeschleunigung
h	m	Höhe
h_v	J/kg	Verdampfungsenthalpie
j	kg/(m ² s)	diffusive Massenstromdichte
k	J/K	Boltzmannsche Konstante
k	m ² /s ²	turbulent kinetische Energie
l	m	Länge
n	—	Anzahl Kontrollvolumina im Lackfilm
n	—	Brechungsindex
p	Pa	Druck
p_s	Pa	Sättigungsdruck
\dot{q}	W/m ²	Wärmestromdichte
r	—	Exponent
\vec{r}	m	Ortsvektor
r_h	m	hydrodynamischer Radius
s	m	Wanddicke, Blechstärke
s	m	Strahlungslänge
\vec{s}	m	Richtungsvektor Strahlung
\vec{s}'	m	Wanddicke, Blechstärke
t	°C	Temperatur
t	s	Zeit
u	m/s	Geschwindigkeit
\bar{u}	m/s	mittlere Geschwindigkeit
u_τ	m/s	Schubspannungsgeschwindigkeit
u_v	m/s	volumengemittelte Geschwindigkeit
v	m ³ /kg	spezifisches Volumen
\hat{v}	m ³ /kmol	partiell Molvolumen
\bar{v}	m ³ /kmol	spezifisches molares Volumen
$\sum v_i$	—	Diffusionsvolumen der Komponente i
w	m/s	Austrittsgeschwindigkeit
x_i	—	Molanteil der Komponente i in der Flüssigkeitsphase

y	m	Zellknotenabstand normal zur Wand
y_i	—	Molanteil der Komponente i in der Gasphase
y^+	—	dimensionsloser Wandabstand
y^*	—	dimensionsloser Wandabstand
z	m	räumliche Koordinate im Lackfilm
z_0	m	Höhe des ersten Kontrollvolumens in der Grenzschicht

Griechische Großbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
Θ	—	skalare Funktion
Φ	—	Volumenanteil
Φ	—	Wellenlängenfunktion
Ω'	<i>rad</i>	Raumwinkel

Griechische Kleinbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
α	W/(K m ²)	Wärmeübergangskoeffizient
α	—	Steuerparameter Zeitdiskretisierung
β	°	Applikationswinkel
β	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient
γ_i	—	Aktivitätskoeffizient der Komponente i
ϵ	—	Emissionskoeffizient
ϵ	m ² /s ³	Dissipationsrate
η	Pa s	dynamische Viskosität
η	—	dimensionslose räumliche Koordinate im Lackfilm
λ	W/(K m)	Wärmeleitfähigkeit
λ	nm	Wellenlänge Licht
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
ξ_i	—	Massenanteil der Komponente i
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmann Konstante
σ_s	1/m	Streuungskoeffizient
τ	s	Zeit
τ_W	N/m ²	Wandschubspannung
ϖ	—	Filmbildungsgrad
φ	—	Faservolumenanteil

ϕ	—	Transformationsfunktion
ϕ_i	—	Fugazitätskoeffizient der Komponente i
χ	—	Interaktionsparameter
ψ	—	Transformationsfunktion
ψ	—	relativer Fasermassenanteil
ω	$1/s$	charakteristische Frequenz der energiedissipierenden Wirbel

Subskripte

Bezeichnung	Bedeutung
BG	Butylglykol
E	Speicherstelle benachbartes Kontrollvolumen „rechts“ von P
KTL	Kathodische Tauchlackierung
L	Lack
L1	Lösemittel 1
L2	Lösemittel 2
LM	Lösemittel
LU	Luft
M	Messstelle
ML	Modelllacksystem
MP	Messpunkt
O	Oberseite Substrat
P	Polymer
P	Speicherstelle im Kontrollvolumen
PU	Polyurethan
RL	Reallacksystem
S	Substrat
TLC	Thermochrome Flüssigkristalle
U	Umgebung
U	Unterseite Substrat
UD	Unidirektionale Schicht
W	Speicherstelle benachbartes Kontrollvolumen „links“ von P
WA	Wasser
e	Berandung Kontrollvolumen „rechts“
f	Stoffdaten Faser in Faserverbundwerkstoff
i	Index Zellen in Grenzschicht
i	Komponente in einem Gemisch

j	Komponente in einem Gemisch
k	Anzahl der Komponenten in einem Gemisch
m	Stoffdaten Matrix in Faserverbundwerkstoff
mix	Gemisch (<i>engl.</i> mixture)
r.F.	relative Luftfeuchtigkeit
tr.LU	trockene Luft
w	Berandung Kontrollvolumen „links“
∞	Fernfeld
\perp	Prallanströmung
\parallel	Parallelanströmung
Z	Z-förmige Probengeometrie

Superskripte

Bezeichnung	Bedeutung
G	Gasphase
F	Flüssigkeitsphase
l	Zeitschritt
ph	Phasengrenze

Akronymverzeichnis

Bezeichnung	Bedeutung
CCD	Charge-coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
CKA	Chromatisch-konfokale Abstandsmessung
CPU	Hauptprozessor (<i>engl.</i> central processing unit)
DO	Discrete Ordinates Radiation Model Theory
DTRM	Discrete Transfer Radiation Model Theory
ESTA	Elektrostatische Applikationsmethode
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GUI	Graphical User Interface
HSV	Farbraum (<i>engl.</i> hue, saturation, value)
KTL	Kathodische Tauchlackierung
NC	Numerical Control
ML	Modelllack

MRI	Magnetresonanztomographie (<i>engl.</i> Magnetic Resonance Imaging)
PBCS	Pressure-based coupled solver
PBSS	Pressure-based segregated solver
RTE	Radiative Transfer Equation
RL	Reallack
S2S	Surface-to-Surface Radiation Model Theory
UDF	User Defined Function
VOF	Volume of Fluid
WSGGM	Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model

Dimensionslose Kennzahlen

Bezeichnung	Bedeutung		Name
Co	$\frac{\text{Geschwindigkeit} \cdot \text{Zeitschrittweite}}{\text{Gitterauflösung}}$	$= \frac{u \cdot \Delta \tau}{\Delta x}$	Courant-Zahl
Gr	$\frac{\text{Auftriebskräfte} \cdot \text{Trägheitskräfte}}{(\text{Reibungskräfte})^2}$	$= \frac{-\beta(T_S - T_\infty)gL^3}{\nu^2}$	Grashof-Zahl
Ma	$\frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{Schallgeschwindigkeit}}$	$= \frac{u}{u_{\text{Schall}}}$	Mach-Zahl
Pe	$\frac{\text{konvektiver Wärmetransport}}{\text{Wärmetransport mittels Wärmeleitung}}$	$= \frac{L \cdot u}{a} = Re \cdot Pr$	Péclet Zahl
Pr	$\frac{\text{Impulsaustausch durch Reibung}}{\text{Wärmeübertragung durch Wärmeleitung}}$	$= \frac{\nu}{a}$	Prandtl-Zahl
Re	$\frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Reibungskräfte}}$	$= \frac{uL}{\nu}$	Reynolds-Zahl
Ri	$\frac{\text{Auftriebskräfte}}{\text{Trägheitskräfte}}$	$= \frac{Gr}{Re^2}$	Richardson-Zahl

1. Einleitung

„Trocknen wird es doch eigentlich immer“ ist eine Aussage, die ich häufig zu hören bekomme, wenn ich mein Forschungsthema vorstelle. Diese Aussage ist auch vollkommen berechtigt, denn unser alltäglicher Umgang mit Trocknungsprozessen, egal ob es sich um organische Farblacksysteme oder die Wäsche auf der Leine handelt, lehrt uns genau dies. Auch alle von mir lackierten Probebleche trockneten anstandslos. Man muss für die Trocknung nur genug Zeit aufwenden und für die richtigen Umgebungsbedingungen sorgen. Leider steht im industriellen Umfeld weder viel Zeit zur Verfügung, noch kann man sich fehlerhafte Lackierungen, verursacht durch „falsche“ Umgebungsbedingungen, erlauben. In dieser Arbeit wird daher mit einem Trocknungsmodell, implementiert als Zusatzmodell für ein Strömungssimulationsprogramm, ein Werkzeug vorgestellt, dass die Vorhersage von Trocknungsprozessen in industriellen Trocknungsanlagen erleichtern soll.

1.1. Motivation und Aufgabenstellung

Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes „SiLat“ (Simulation der instationären Lacktrocknung bei dreidimensionalen Objekten) [88]¹ war die Entwicklung und Bereitstellung eines experimentell verifizierten Simulationsprogramms zur Vorhersage der instationären Filmtrocknung auf beliebigen räumlichen Bauteilgeometrien in komplexen Strömungsfeldern. Dabei sollte ein Trocknungsmodell entwickelt werden, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Trocknung von Karosserien in einem Durchlauftrockner in der Automobilindustrie zu berechnen. Abbildung 1.1 zeigt schematisch die Prozessschritte in einer Lackieranlage in der Automobilindustrie nach *Goldschmidt und Streitberger* [39]. Aus einem Zwischenlager werden die Karosserien aus der Fertigung in die Lackieranlage geliefert. Nach einem Reinigungsprozess erfolgt zunächst eine Passivierung der Karosserieoberfläche zum Korrosionsschutz durch eine Phosphatierung. Anschließend wird durch eine Elektro-Tauchlackierung eine KTL-Schicht (Kathodische Tauch-Lackierung) aufgetragen und durch das Einbrennen bei erhöhter Temperatur ausgehärtet. Die KTL-Schicht dient ebenfalls dem Korrosionsschutz. Im Unterbodenbereich werden der Unterbodenschutz aufgebracht sowie kritische Nähte abgedichtet. Der nachfolgend applizierte Füller dient zur Egalisierung der Oberfläche und wird wiederum bei einer Temperatur oberhalb der Raumtemperatur (beispielsweise 140 °C) „eingebrannt“. Nach einem Schleif- und Reinigungsschritt wird schließlich der farbgebende Basislackaufbau gegebenenfalls mehrfach appliziert und zwischengetrocknet, wie etwa bei der Verwendung von Metalleffekt-Lacken. Hier wird zunächst eine farbige Lackschicht ohne metallische Partikel appliziert. Die zweite, nachfolgend applizierte Schicht beinhaltet die Metallpartikel, sogenannte „Flakes“. Aber auch Lacke ohne Metallpartikel, so genannte Uni-Lacke², werden in mehreren Schichten appliziert und zwischengetrocknet. Bei der Applikation der Lacke kommen vorzugsweise elek-

¹Förderkennzeichen TTD-Teilprojekt: 01 RI 05192, Laufzeit 10/2006 - 09/2009

²uni: *frz.* einfarbig

trostatische Applikationsmethoden (ESTA) zum Einsatz. Nach den Zwischentrocknungen (beispielsweise 30 min bei 70 °C) zwischen den Applikationen der einzelnen Basislackschichten (Flash Off) wird abschließend der Klarlack wiederum mittels eines ESTA-Verfahrens appliziert und eingebrannt (beispielsweise 25 min bei 140 °C). Nach einer manuellen Qualitätskontrolle und einer eventuellen Korrektur von Lackierfehlern wird die Karosserie für die Montage freigegeben.

Der im Rahmen des SiLat-Projekt zu beschreibende Trocknungsschritt ist in Abbildung 1.1 mit „c“ gekennzeichnet. Bei der Trocknerbauart handelt es sich um Durchlauf-Konvektionstrockner, durch die das Trocknungsgut bewegt wird [45]. Als Trocknungsgas wird in den Durchlauf-Konvektionstrocknern in der Automobilindustrie Luft eingesetzt. Die Trocknung beginnt unmittelbar bei der Applikation und beim Transport der Karosserie in den Trockner bei Raumtemperatur. Im Trockner selbst werden Temperaturen von etwa 70 °C bei der Basislacktrocknung und bis zu 140 °C bei der Klarlacktrocknung eingestellt. Der Wärmeeintrag in Lackschicht und Karosserie kann in den Trocknern durch Infrarotstrahler unterstützt werden. Die Prozessschritte „a“, „b“, „d“ und „e“ sind zwar ebenfalls Trocknungsprozesse, standen jedoch nicht im Fokus des SiLat-Projektes.

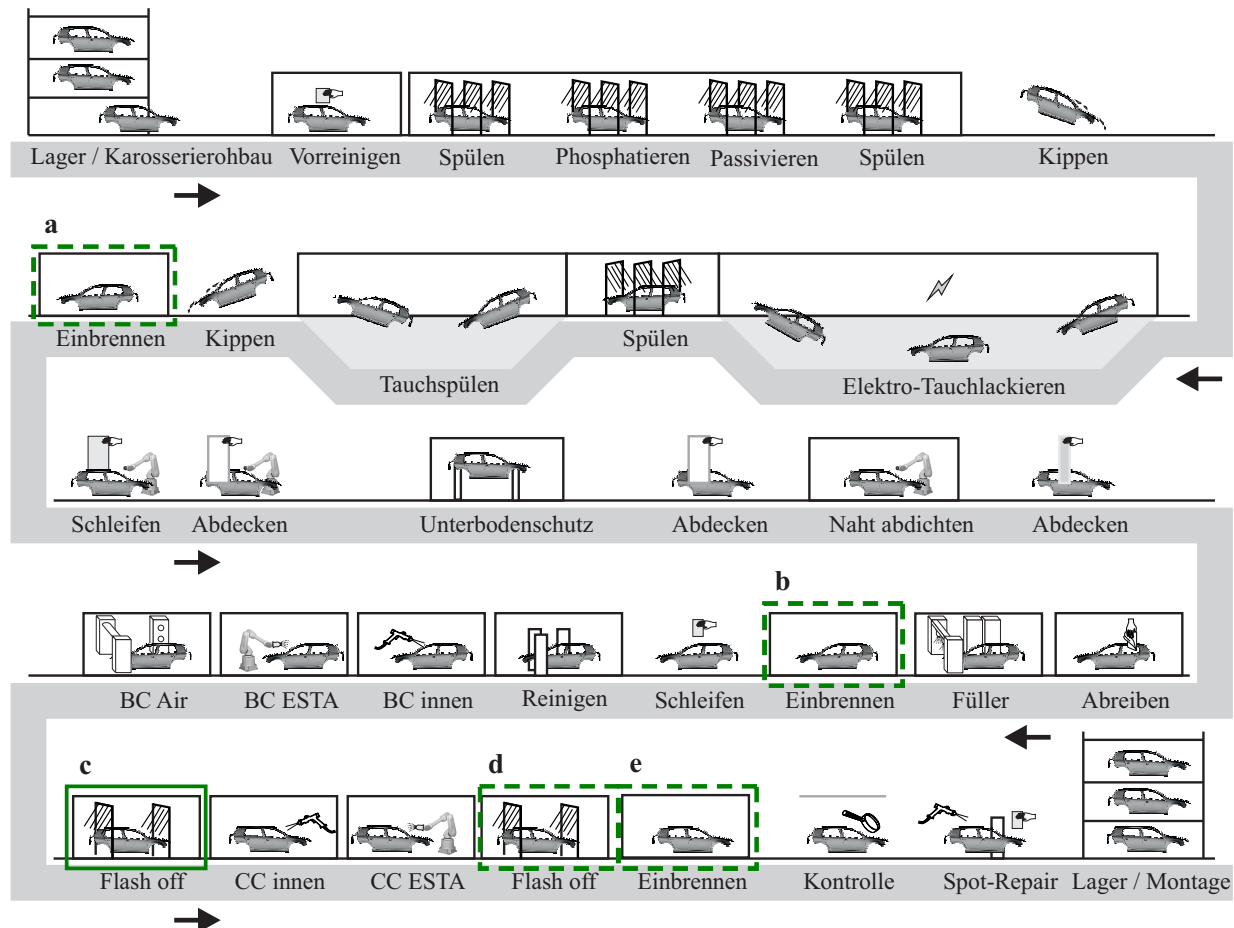


Abbildung 1.1.: Prozessschritte in einer Automobil-Lackieranlage [39]

Neben der Vorhersage der lokalen und transienten Trocknung soll im SiLat-Projekt auch eine Vorhersage für die Wahrscheinlichkeit für mögliche Lackierfehler getroffen werden. Die Photographie von *Andreas Feiniger* (Abbildung 1.2) zeigt exemplarisch eine „ideale“

Karosserieoberfläche und weist somit die Qualitätsparameter nach *DIN EN ISO 28199-3* [24] auf. Anhand der Prüfmerkmale

- Schichtdicke nach ISO 2808
- Oberflächenstruktur
- Farbe nach ISO 7724

werden in Verbindung mit einer visuellen Beurteilung die folgenden Eigenschaften bewertet:

- Farbstabilität, Prozessdeckvermögen, Anlösen, Spritznebelaufnahme, Benetzung, Oberflächenstruktur und Wolkigkeit (DIN EN ISO 28199-2)
- Ablaufneigung, Kocherbildung, Nadelstichbildung, Deckvermögen (DIN EN ISO 28199-3).



Abbildung 1.2.: Feiniger - Reflection in Automobile

Feiniger zeigt in der abgebildeten Photographie Reflexionen eines Gebäudes auf einer Motorhaube. Die Reflexionen der Gebäudestrukturen gleichen von Weitem betrachtet den Reflexion in der Windschutzscheibe des Automobils. Damit ist die Oberfläche der Lack-schicht so geringfügig strukturiert, dass das optische Erscheinungsbild nicht beeinträchtigt wird. Eine ähnliche Qualität darf auch bezüglich der anderen oben genannten Parameter unterstellt werden.

Um die dargestellte optische Qualität, aber auch die Beständigkeit gegen Korrosion oder Steinschlag einzustellen, wird eine Lackierung in verschiedenen Prozessschritten mehrschichtig aufgebaut. Abbildung 1.3a zeigt einen möglichen Schichtaufbau für eine Karosserie aus der Automobilindustrie.

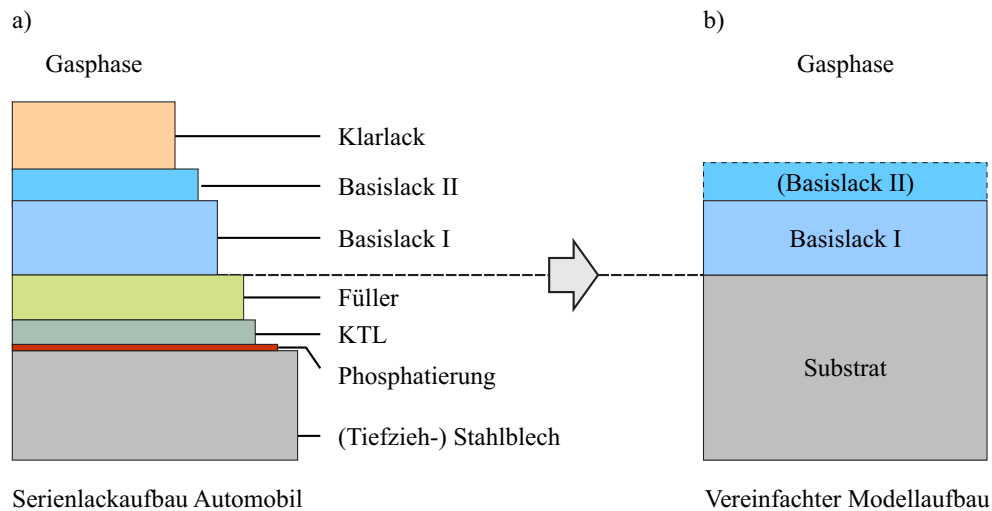


Abbildung 1.3.: Lackschichtaufbau

Im SiLat-Projekt wird vereinfachend von einem Substrat ausgegangen, auf dem eine oder gegebenenfalls mehrere wasserbasierte Lackschichten getrocknet werden. Die Phosphatierung, die KTL-Schicht sowie der eventuell aufgetragene Füller werden mit dem darunterliegenden Karosseriestahl in dieser Arbeit zu einem diffusionsdichten Substrat zusammengefasst (Abbildung 1.3b). Der abschließend applizierte und getrocknete Klarlack wird im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande betrachtet. Schwerpunkte stellen die experimentelle Erfassung sowie die numerische Modellierung der Thermodynamik bei der Trocknung der wasserbasierten Lackschicht in einem Konvektionstrockner dar.

1.2. Grundbegriffe der Filmbildung und Trocknung

In der industriellen Praxis eingesetzte Lacksysteme sind ein komplexes Gemisch vieler Komponenten in teilweise nur sehr geringer Konzentration. Grundsätzlich bestehen flüssige Beschichtungsstoffe aus zwei Anteilen: flüchtige und nicht-flüchtige Stoffe (Tabelle 1.1).

nicht-flüchtiger Anteil	flüchtiger Anteil
Bindemittel	Lösemittel
Pigmente	oder
Additive	Dispersionsmittel
Flakes	Additive

Tabelle 1.1.: Zusammensetzung von Lacksystemen nach *Mischke* [68]

Als *Bindemittel* werden diejenigen Stoffe bezeichnet, die in Abwesenheit der anderen chemischen Bestandteile des Beschichtungsstoffes grundsätzlich in der Lage sind, den trockenen

Film zu bilden. *Pigmente* sind feinteilige, im Beschichtungssystem unlösliche Pulver, die farbgebend, korrosionshemmend, kratzbeständigkeitsfördernd oder anderweitig funktionell wirksam sind. *Additive* liegen in einer Beschichtungsrezeptur in jeweils geringen Mengen vor und könnten flüchtig oder nicht-flüchtig sein. Sie dienen dazu, bestimmte Filmeigenschaften einzustellen, wie etwa Vermeidung einer Hautbildung bei der Trocknung an der freien Oberfläche, Schäumen oder Katalyse bestimmter Stoffe. *Lösemittel* sind Flüssigkeiten, die ein Bindemittel molekulardispers auflösen. *Dispersionsmittel* hingegen umschließen das Bindemittel, das in sehr kleiner Tröpfchenform vorliegt. *Flakes* sind metallische Partikel, die für Metall-Effektlackierungen dem Lacksystem beigemischt werden.

Enthält ein Beschichtungsstoff ein Bindemittel, dessen Moleküle sich bei während der Verdunstung der Lösemittel durch sekundäre Bindungen vernetzen, so spricht man von einer *physikalischen Trocknung*. Vernetzt sich das Bindemittel chemisch während der Trocknung, spricht man von einer *Härtung*.

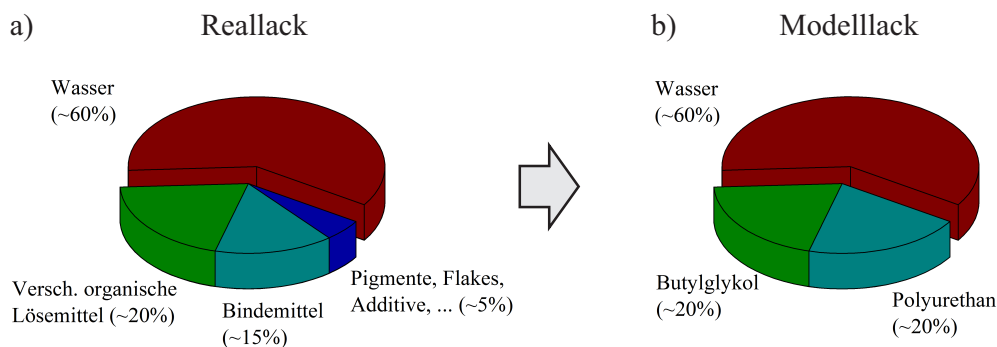


Abbildung 1.4.: Zusammensetzung von Reallack - Modelllack

Abbildung 1.4a zeigt beispielhaft die Zusammensetzung eines industriell eingesetzten wasserbasierten Lacksystems nach *Goldschmidt und Streitberger* [39]. Etwa 60 % Massenanteil der so genannten „Topfmischung“ entfallen auf das Wasser, weitere 20 % sind organische Löse- bzw. Dispersionsmittel sowie flüchtige Additive. Die verbleibenden 20 % sind der eigentliche Lack, bestehend aus Bindemittel, Pigmenten, nicht-flüchtigen Additiven und eventuell Flakes bei Metall-Effektlackierungen. Diese komplexen Mischungsrezepturen können kaum in einem Trocknungsmodell abgebildet werden. Hierfür fehlen Stoffdaten wie beispielsweise Diffusionskoeffizienten und chemische Potentiale, die in Abhängigkeit der Konzentration jeder einzelnen Komponente sowie der Temperatur vorliegen müssen. Daher wird zur Trocknungssimulation von einem vereinfachten Modelllacksystem ausgegangen, das die thermodynamischen Eigenschaften eines Reallacksystems näherungsweise beschreibt (Kapitel 5.2.4). Das Modelllacksystem, entsprechend Abbildung 1.4b, ist ein ternäres Gemisch und besteht zu 60 % aus Wasser (Dispersionsmittel), zu 20% aus Butylglykol (organisches Dispersionsmittel) und dem Feststoff Polyurethan. Für dieses Modelllacksystem sind alle relevanten Stoffwerte bekannt [96].

Das Modelllacksystem weist die Trocknungscharakteristika einer Dispersion auf. Abbildung 1.5 zeigt schematisch die Modellvorstellung einer über die Schichtdicke homogen verlaufenden Dispersionstrocknung. Ein Polymer-Feststoff, beispielsweise Polyurethan, ist in einer Lösung aus Butylglykol und Wasser dispergiert und wird auf einem diffusionsdichten Sub-

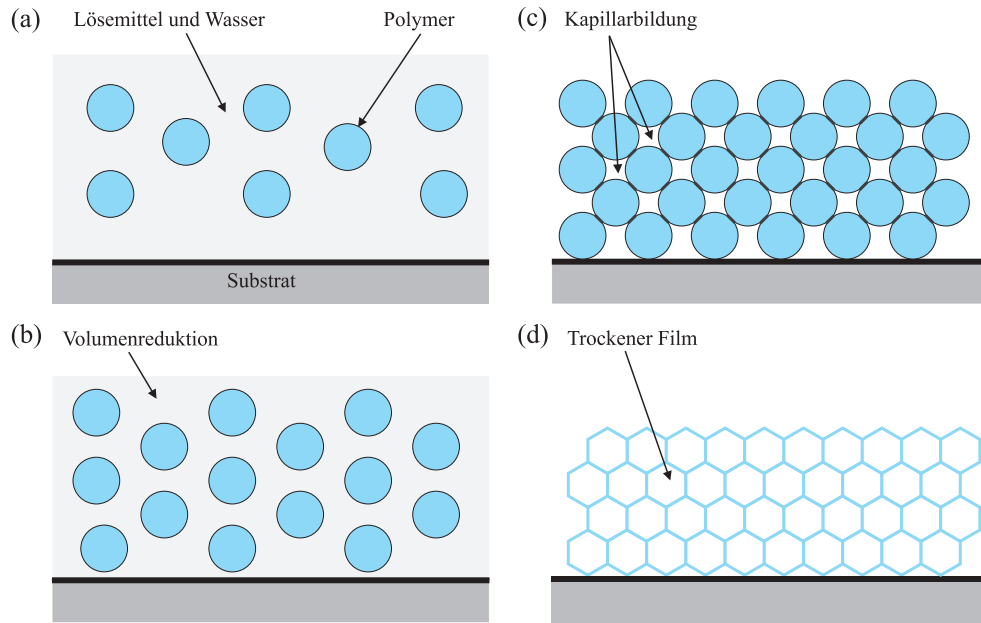


Abbildung 1.5.: Physikalische Trocknung (Dispersionstrocknung)

strat appliziert (1.5a). Durch die Verdunstung der Dispersionsmittel an der freien Oberfläche nimmt das Volumen des Dispersionsmittels ab (1.5b), bis die Polymere miteinander in Kontakt treten (1.5c). Es kommt zu einer Kapillarbildung und schließlich durch Umlagerung und Deformation der Polymere zur Formierung eines festen, trockenen Films (1.5d). Der Übergang von der freien Verdunstung hin zur kapillarkraft- bzw. diffusionsgetriebenen Trocknung ist auch thermodynamisch beobachtbar. Abbildung 1.6 zeigt beispielhaft vorab einen gemessenen Massen- und Temperaturverlauf des ternären Modelllacksystems aus Wasser-Butylglykol-Polyurethan bei einer Trocknungstemperatur oberhalb der Umgebungstemperatur im Prallströmversuch (Versuch V414). Die Trocknung kann in zwei Abschnitte eingeteilt werden. Im ersten Trocknungsabschnitt nimmt die Masse des Lackfilms, ausgehend von der applizierten Masse M_0 durch die freie Verdunstung der Dispersionsmittel an der Lackoberfläche linear ab. Durch den Energieentzug bei der Verdunstung verläuft die Temperatur der Probe ausgehend von der Umgebungstemperatur t_0 zunächst asymptotisch zur Gutsbeharrungstemperatur³ (Abbildung 1.6, Abschnitt I). Die Gutsbeharrungstemperatur liegt bei den Trocknungsversuchen oberhalb der Kühlgrenztemperatur^{4 5}, da bei den lackierten Blechen auch von der nicht-lackierten Blechrückseite Wärme eingebracht wird. Ist das Dispersionsmittel weitestgehend verdunstet, wird der Massenstrom in die Gaspha-

³Die Verdunstung von Löse- und Dispersionsmitteln aus einem Trocknungsgut führt einer Temperaturänderung des Trocknungsgutes. Die sich in einem Gleichgewichtszustand einstellende Temperatur wird als *Gutsbeharrungstemperatur* bezeichnet. *Krischer und Kast* [57] stellen fest, dass bei der Verdunstung Lösemittelhaltiger Gemische die Gutsbeharrungstemperatur oberhalb der Kühlgrenztemperatur liegt. Im vorliegenden Fall verstärkt weiterhin die Wärmeübertragung durch Strahlung diesen Effekt.

⁴Wird eine ebene Wasseroberfläche mit trockener Luft überströmt und dabei die Wärmeübertragung durch Strahlung mit der Umgebung minimiert, stellt sich durch Verdunstung von Wasser in der Grenzschicht zwischen Wasser und Luft bei hinreichend langem Überströmweg ein Sättigungszustand ein. Die sich in der Grenzschicht einstellende Temperatur wird als *Kühlgrenztemperatur* bezeichnet.

⁵Die Kühlgrenztemperatur für eine in Abbildung 1.6 dargestellte Anströmtemperatur von 68 °C und einer absoluten Luftfeuchtigkeit $X_{LU} = 6 \text{ g/kg}_{\text{tr.LU}}$ und einem absoluten Druck $p = 1013 \text{ mbar}$ beträgt 27,5 °C.

se durch die Diffusion im Lackfilm limitiert. Dies ist mit einer Temperaturzunahme bis zur Anströmungstemperatur t_2 verbunden (Abbildung 1.6, Abschnitt II). Die Masse des Lackfilms nimmt nun asymptotisch bis zum Trockengewicht M_2 der Probe ab. Erster und zweiter Trocknungsabschnitt können daher durch einen Wendepunkt im Temperaturverlauf mit der Temperatur t_1 und dem Übergang von linearer zu asymptotischer Massenabnahme (M_1) unterschieden werden. Da die Trocknungsluft mit dem Dispersionsmittel Wasser beladen ist, hängt das sich einstellende Trockengewicht von der Wasserbeladung der Luft ab. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem hygroskopischen Trocknungsgut [57].

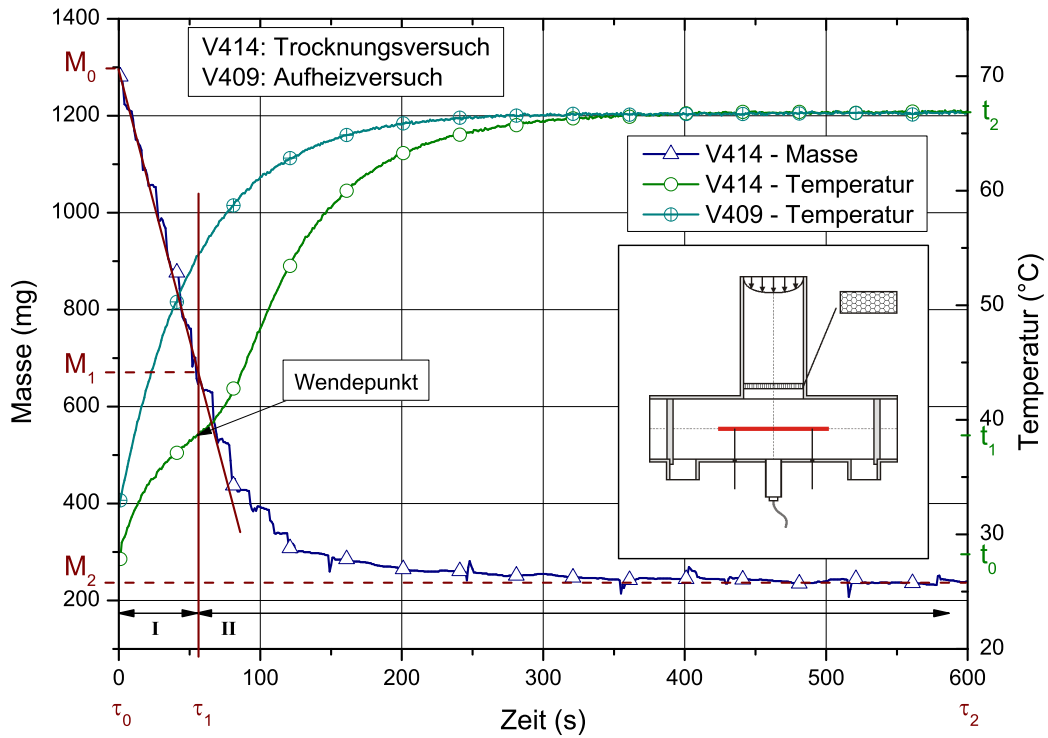


Abbildung 1.6.: Aufheizen und physikalische Trocknung in einer Prallanströmung

Die gleichen Trocknungscharakteristika, jedoch mit einem ausgeprägteren Temperaturhaltepunkt, können bei der Trocknung eines ebenen Probebleches bei einer Parallelanströmung beobachtet werden. Dies zeigt beispielhaft vorab das Ergebnis eines Versuchs in Abbildung 1.7. Aufgrund des verringerten Wärmeübergangs in der Parallelanströmung im Vergleich zur Prallanströmung, ausgedrückt durch das Verhältnis der aus Simulationen berechneten Wärmeübergangskoeffizienten⁶ $\alpha_{\parallel}/\alpha_{\perp} = 8,78/18,88 = 0,47$, kann sich das Gutsbehaltungstemperaturniveau deutlich ausbilden. Ist das freie Oberflächenwasser verdunstet, dominieren die diffusiven Transportvorgänge das Aufheiz- und Masseabnahmeverhalten des Trocknungsvorgangs.

Weiterhin zeigt Abbildung 1.7 den transienten Temperaturverlauf eines Probebleches in Parallelanströmung ohne applizierten und trocknenden Lack (V565). Die Temperatur des Bleches nimmt von der Starttemperatur t_0 bis zur Anströmungstemperatur t_2 asymptotisch zu. Bezüglich des Temperaturverlaufes ist eine deutliche Verzögerung bis zum Erreichen

⁶Die Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten-Zahlen wird in Kapitel 5.5.2 erläutert.

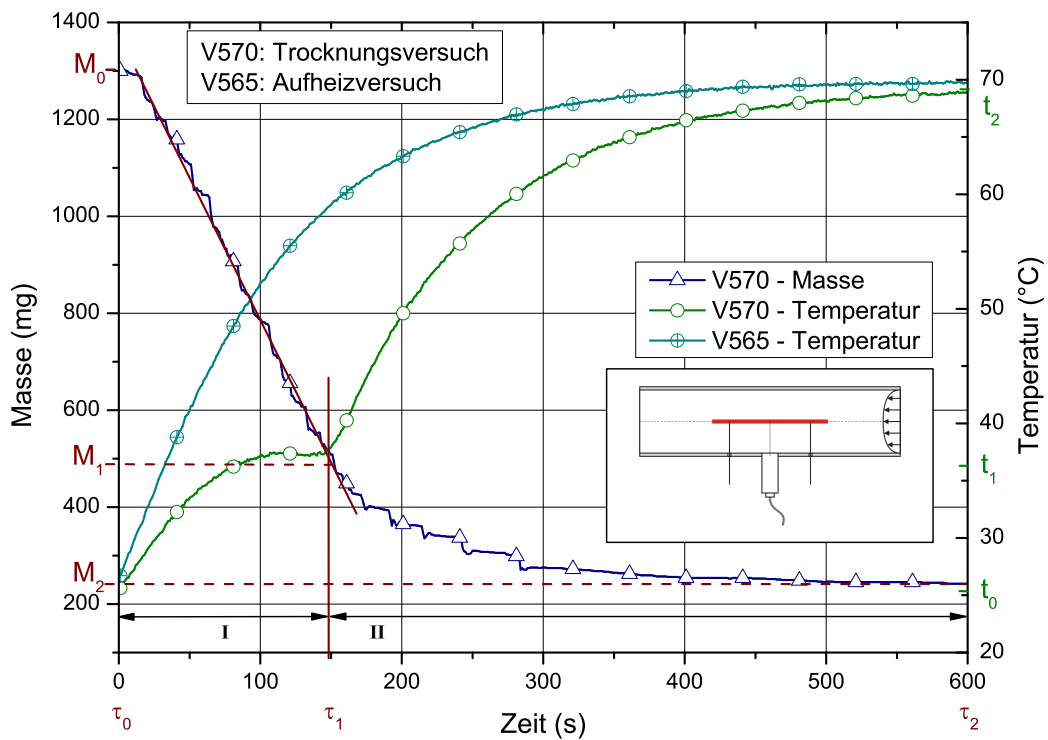


Abbildung 1.7.: Aufheizen und physikalische Trocknung in einer Parallelanströmung

einer bestimmten Temperaturgrenze ersichtlich. So wird beispielsweise im Aufheizversuch eine Temperatur von 60 °C bereits nach $\tau_{|60^{\circ}\text{C}} = 159$ s erreicht, im Trocknungsversuch werden $\tau_{|60^{\circ}\text{C}} = 281$ s, also etwa 2 min länger benötigt. Auch im Prallströmversuch (V409, Abbildung 1.6) ist eine Verzögerung zwischen Trocknungsversuch und bloßem Aufheizversuch ersichtlich.

In der industriellen Praxis wird der Lackfilm während der Trocknung zum Einstellen gewünschter Eigenschaften im getrockneten Zustand für eine bestimmte Zeit auf einem vorher festgelegten Temperaturniveau gehalten. Diese Temperaturhaltezeiten werden von den Lieferanten der Lacksysteme vorgegeben. Zur Qualitätssicherung ist es wünschenswert, Vorhersagen treffen zu können, ob die Haltezeiten bei Änderung der Bauteile (z.B. eine neue Karosserien in der Automobilindustrie) oder Änderungen der Ofenparameter eingehalten werden können. Aufheizsimulationen ohne Berücksichtigung des Lackfilms würden das thermische Verhalten von Bauteilen nur unzureichend abbilden, wie in Abbildung 1.6 und 1.7 dargestellt. Die thermodynamische Berücksichtigung der Lacktrocknung in einer Strömungssimulation eines Trockners ist somit auch aus diesem Grund unerlässlich.

2. Stand der Forschung

Im Folgenden wird der Stand der Forschung bezüglich der experimentellen sowie numerischen und analytischen Untersuchungen zur Trocknung dünner Filme skizziert. Da die Trocknung dünner Filme in unterschiedlichsten Bereichen von Interesse ist, existieren zu diesem Themenbereich zur Beantwortung von Fragestellungen aus verschiedenen Motivationen heraus auch eine Vielzahl von Modellen und experimentellen Untersuchungsformen. Bei Trocknungsprozessen spielen die in Tabelle 2.1 genannten physikalischen Phänomene eine wichtige Rolle. Außerdem ist der in dieser Arbeit gewählte Weg zur modellhaften Repräsentation der jeweiligen Phänomene angegeben.

Physikalisches Phänomen	Modellierung
Wärmetransport im Substrat	Wärmeleitung
Wärmetransport im Lackfilm	Wärmeleitung und -quelle / -senke
Massetransport im Lackfilm	Fick'sches Diffusionsgesetz
Konvektiver Wärmeübergang Lackoberfläche	Nusselt-Beziehung oder CFD
Masseübergang Lackoberfläche	Sherwood-Beziehung oder CFD
Phasengleichgewicht Luft - Lackoberfläche	Chemisches Potential
Änderung der Schichtdicke	Massenbilanz
Wärmeeintrag in Lackfilm durch Strahlung	Strahlungstransportgleichung
Wärmetransport in der Gasphase	CFD
Stofftransport in der Gasphase	CFD

Tabelle 2.1.: Berücksichtigte Phänomene bei der Trocknung dünner Filme

Die nachfolgend diskutierten Arbeiten wurden so ausgewählt, dass sie die oben genannten physikalischen Phänomene weitestgehend berücksichtigen. Auf eine ausführliche Literaturstudie zu jedem einzelnen physikalischen Phänomen wurde zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet. Statt dessen wird auf ausgewählte, weiterführende Literatur an entsprechenden Stellen verwiesen. Ferner werden einige wenige Arbeiten, die trocknungsähnliche Stofftransportvorgänge wie etwa Tropfenverdampfung oder Marangoni-Effekte behandeln, exemplarisch aufgeführt. Sie werden daher auch nicht in Tabelle 2.1 aufgeführt, obgleich sie in der Realität auftreten. Die in der Literatur vorhandenen Arbeiten behandeln sowohl vielkomponentige Reallacksysteme als auch zumeist binäre oder ternäre Laborsysteme.

2.1. Modellierung der Filmtrocknung

Die aufgeführten Modelle zur Filmtrocknung werden im Folgenden in drei Gruppen unterschieden. Dies sind zum einen Modelle, die den Verdunstungsprozess und den Massetransport im Film ein- oder mehrdimensional beschreiben. Ein Rückschluss auf den Filmbil-

dungsprozess und somit auch auf Qualitätsparameter ist nur indirekt über Konzentrationsverteilungen im Film ersichtlich. Die Modelle der zweiten Gruppe berücksichtigen daher zusätzlich den Strukturbildungsprozess im Film. In einer dritten Gruppe werden Arbeiten zitiert, die zur Auslegung und Optimierung kompletter Trocknungsanlagen herangezogen werden können.

2.1.1. Massentransport und Phasenübergang

Athey [5] stellt ein statistisches Modell auf, das auf Versuchen unter Variation der Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Schichtdicke sowie der Wärmeleitfähigkeit und Porosität des Substrates, basiert. Wesentliche Faktoren in den Polynomtermen des Modells sind Lufttemperatur und die parametrisierte Trocknungszeit. Die Modellierung kann jedoch nur jeweils einen Trocknungsabschnitt zuverlässig beschreiben.

Alsoy und Duda [1] beschreiben unter Berufung auf die Arbeit von *Vrentas und Vrentas* [106] die Trocknung dünner Filme, bestehend aus einem ternären Gemisch in einem mehrzonalen Konvektionstrockner. Sie vernachlässigen den Temperaturgradienten über die Höhe des Films. Die Berechnung der Trocknung erfolgt in einem nicht-äquidistanten Gitter mittels der Finite-Differenzen-Methode. Es werden vier verschiedene Varianten zur Berücksichtigung der Diffusionskoeffizienten vorgeschlagen. Der Stofftransport an der Oberfläche des Lackfilms wird mittels der Flory-Huggins-Theorie berechnet. In der Arbeit werden für zwei ternäre Gemische die transienten Trocknungskurven für Massen- und Temperaturverlauf präsentiert. Diese weisen zwei klar voneinander unterscheidbare Trocknungsabschnitte auf. In der Massentransportgleichung wird jedoch der Konvektionsterm nicht berücksichtigt, obwohl auf einem schrumpfenden Gitter gerechnet wird. Damit entspricht die Vorgehensweise derjenigen von *Schröder* [93] und *Geipel* [36].

In einer weiteren Arbeit beschreiben *Alsoy und Duda* [2] für ihr aufgestelltes Trocknungsmodell die Gleichungsformulierungen für mehrere Lackschichten. Die Flory-Huggins-Theorie wird zur Beschreibung der flüssig-flüssig-Phasengrenze der aneinander angrenzenden Filme verwendet, da die Festkörper je Lackschicht unterschiedlich sind. Das Lösebeziehungsweise Dispersionsmittel bleibt jedoch dasselbe. Effekte durch verschiedene Oberflächenspannungen oder Relaxationen, hervorgerufen durch die unterschiedlichen Polymere an der Phasengrenze, werden vernachlässigt. Am Beispiel eines binären Gemisches werden entsprechende numerische Rechnungen durchgeführt.

Czaputa et al. [18] [19] [20] berechnen numerisch das Trocknungsverhalten von flüssigen Beschichtungen auf kreiszylindrischen Filamenten. In der Schicht werden die für Zylinderkoordinaten aufgestellten Transportgleichungen für ein binäres Gemisch von Polyvinylalkohol und Wasser in radialer Richtung gelöst. In der Transportgleichung wird der diffusive Term mit einem temperatur- und konzentrationsunabhängigen Diffusionskoeffizienten berechnet. An der freien Lackoberfläche wird eine konstante Sherwoodzahl vorgegeben. Für geringe Filamentradien werden die durchgeführten Berechnungen mit einer analytischen Betrachtung verglichen und eine gute Übereinstimmung festgestellt.

Mintzlauff [65] modelliert den Energie- und Stofftransport im Lackfilm anhand der Finite-Volumen-Methode eindimensional, senkrecht zur Substratoberfläche. Neben dem Stofftransport im Lackfilm berechnet er auch das Eindringen von Lack in das Papier. Die Resultate überführt er anschließend in ein überschlägiges Auslegungsmodell für Papier-trockner, welches für Trocknungen mit ausgeprägtem ersten Trocknungsabschnitt gültig ist. Der zweite Trocknungsabschnitt wird von dem Modell nicht abgebildet.

Ondratschek et al. [71] identifizieren vier relevante Parameter für die Trocknung von wasserbasierten Lacken: Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Anströmungsgeschwindigkeit. Sie diskutieren die Abhängigkeit der Trocknung im ersten Trocknungsabschnitt unter Verwendung von Korrelationen von *Gnielinski* [38] für die Niedertemperaturtrocknung. Die Einflüsse Veränderung von Luftfeuchtigkeit und Anströmungstemperatur auf die Trocknungsgeschwindigkeit werden verglichen. Zu den Berechnungen werden weiterhin experimentelle Ergebnisse präsentiert.

Cairncross und Durning [13] stellen ein eindimensionales Modell zur Trocknung von viskoelastischen Lösungen auf. Dazu wird in der eindimensionalen Transportgleichung außer dem Diffusionsterm noch ein weiterer Summand eingeführt, der von der zeitlichen Änderung der Konzentration abhängt. Mit dem Modell sollen unterschiedliche Arten des „Skinings“ erklärt werden, was aber nicht zufriedenstellend erreicht wird.

Ausgehend von der Verdunstung eines binären Isopropanol-Wasser-Gemisches aus einer porösen Platte in einen konditionierten Luftstrom beschreiben *Schwarzbach et al.* [95] die Selektivität der Trocknung und deren Abhängigkeit von der Porosität. *Riede und Schlönder* [76] [77] [78] erweitern die theoretische Analyse auf ternäre Gemische und identifizieren drei Mechanismen, von denen die Selektivität der Verdunstung maßgeblich abhängt: Dampf-Flüssigkeitsgleichgewicht, Stofftransport in der Gasphase und Stofftransport in der Flüssigkeitsphase. Als weitere Einflussgrößen werden die Eintrittszusammensetzung des trocknenden Luftstroms, der Volumenstrom und die Temperatur des Flüssigkeitsgemisches genannt. Durch unterschiedliche Randbedingungen kann die Selektivität der Trocknung beeinflusst werden. Dies wird experimentell an einem Isopropanol-Wasser-Glycerin-Gemisch bestätigt. *Saure et al.* [84] stellen ein eindimensionales Trocknungsmodell auf, welches dem von *Schröder* [93] und *Geipel* [36] aufgestellten Modell sehr nahe kommt. Das Modell wird erfolgreich mit experimentell ermittelten Daten verglichen (Kapitel 2.2).

Gehrmann [35] schlägt für die Berechnung der von ihm aufgestellten eindimensionalen und instationären Gleichung für den Stofftransport in Gelatineschichten das Finite-Differenzen-Verfahren vor. Für einen analytisch berechenbaren Sonderfall mit rein Fick'scher Diffusion vergleicht er die transiente Beladungsabnahme erfolgreich mit den Ergebnissen der Simulation.

Schröder [93] stellt ein Trocknungsmodell zur eindimensionalen Modellierung des Wärme- und Stofftransportes in Lackfilmen mit der Finiten-Differenzen-Methode und mitschrumpfenden numerischem Gitter auf. Er verwendet in den Transportgleichungen die von *Skuhr* [96] an levitierten Tropfen bestimmten Diffusionskoeffizienten. Auch *Geipel* [36] verwendet dieses Trocknungsmodell und erweitert es für mehrere Lackschichten und diskutiert verschiedene Methoden zur Modellierung des Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichtes an der Phasengrenze. Er kommt zu dem Schluss, dass nur die Flory-Huggins-Theorie mit entsprechenden Interaktionsparametern die Gesamtmassenabnahme und die Massenströme der einzelnen Komponenten richtig abbildet. Auch in der vorliegenden Arbeit wird die Flory-Huggins-Theorie nach *Favre et al.* [32] verwendet.

Hecht [43] erweitert das von *Schröder* und *Geipel* entwickelte Trocknungsmodell für zweidimensionale Simulationsgebiete. Dazu modifiziert er die Transport- und Energiegleichung im Lackfilm entsprechend und diskretisiert diese mit der Finite-Differenzen-Methode und dem Crank-Nicholson-Verfahren. Es berechnet die Trocknung von Lackfilmen mit sinusförmiger freier Oberfläche und kann Strömungen im Film für diese Startbedingung nachweisen.

Mit zuvor an Messdaten angepassten Werten für Diffusionskoeffizienten und Aktivitäten berechnen *Schabel et al.* [87] die Trocknung dünner Filme für binäre Polymerlösungen.

Als Lösemittel werden Toluol oder Methanol verwendet, das Polymer ist Polyvinylacetat. *Schabel et al.* verwenden eindimensionale Stofftransportgleichungen in einem mitbewegten Koordinatensystem zur diskreten Modellierung der Filmtrocknung. Im Gegensatz zu vielen anderen Publikationen wird der Diffusionskoeffizient massebezogen aufgestellt. Der Stoffübergang wird mit einem Ansatz nach *Schlünder* [91] beschrieben. Für den Stoffübergangskoeffizienten wird eine Sherwood-Korrelation einer laminar überströmten ebenen Platte gewählt. *Krenn et al.* [55] planen eine Erweiterung zur räumlich mehrdimensionalen Simulation und führen dazu entsprechende Experimente durch [56].

Kiil [49] vergleicht zwei Trocknungsmodelle und entwickelt ein eigenes, ähnliches Modell zur Vorhersage der Trocknung von Latexfilmen in wässriger Lösung. Dabei passt er den effektiven Diffusionskoeffizienten an experimentelle Ergebnisse an. Für die zwei Trocknungsabschnitte nimmt er verschiedene Modelle für die Schichtdicken- und Massenreduktion, basierend auf Wärme- und Stoffübergangsparametern, an. Temperaturgradienten im Film werden vernachlässigt.

2.1.2. Filmbildung und Reaktionen

Routh und Russel [79] stellen ein zweidimensionales numerisches Modell zur Berechnung der Konzentrationsverteilung für ein Wasser-Polymer-Gemisch vor. An der freien Oberfläche des Films verdunstet Wasser, der Massenstrom hängt von der umgebenden Luftfeuchtigkeit und -temperatur ab. In Experimenten wird das Gemisch von Lochplatten bedeckt. Materialanhäufungen, die sich aufgrund des selektiv verlaufenden Verdunstungsprozesses einstellen, können auch simulativ abgebildet werden. In einer weiteren Arbeit stellen *Routh und Russel* [80] vier Mechanismen zur Filmbildung vor. Es werden der Skinning-Effekt, also das schnelle Verdunsten von Löse- und Dispersionsmittel an der freien Oberfläche der Lackschicht, und die nachfolgende Bewegung dieser Trocknungsfront durch den Film beschrieben. Auch die Autoren *Dabral* [21] und *Cairncross et al.* [14] beschreiben neben der Trocknung (*Dabral et al.* [22]) auch die Vernetzung und Reaktionen der Polymere im Film. Ein Modell zur Berechnung der Entwicklung von kraterförmigen Fehlstellen wird von *Evans et al.* [30] vorgeschlagen. Dabei wird in einer zweidimensionalen achsensymmetrischen Simulation ein Oberflächenspannungsgradient durch Variation der Festkörperkonzentration in der Symmetrieachse hervorgerufen. Für eine initial und eine permanent vorliegende Konzentration wird die Kraterausbildung eines binären Festkörper-Lösemittel-Gemisches berechnet.

2.1.3. Trocknersimulation

Krischer und Kast [57] sowie *Kröll* [58] geben eine umfangreiche Übersicht über Trocknerbauarten und -auslegung sowie eine Beschreibung der unterschiedlichen Trocknungsphasen. Die Berechnungsmethoden verwenden, wie auch bei *Schlünder* [91], jedoch Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten für einige wenige Strömungskonfigurationen und können daher nicht universell eingesetzt werden.

Cohen [15] berechnet mit einem einfachen Modell den Wärmeübergang in einem Trockner mit kontinuierlich bewegten Gütern, wie beispielsweise beschichteten Substratbahnen. Als Lösemittel wird Wasser angenommen. Für unterschiedliche Trocknergeometrien führt er Formfaktoren zur Berechnung des Wärmeübergangs ein und berechnet den Stoffübergang anhand des psychrometrischen Zusammenhangs. Daraus erhält er die Verdampfungs-

enthalpie für die Energieerhaltungsgleichung, die global für die gesamte Schicht aufgestellt wird. Außerdem schlägt er ein empirisch-experimentelles Verfahren zur Berechnung des Wärmeübergangs, basierend auf einer Zwei-Punkt-Temperaturmessung im Trocknerraum, vor.

Hecht [43] koppelt erstmals ein Trocknungsmodell erfolgreich mit dem CFD-Solver FLUENT¹ auf Basis von lokalen Nusselt- und Sherwoodzahlen, die anhand konstanter Fernfeldparameter ermittelt werden, und vergleicht die Ergebnisse mit Experimenten [9]. Die Weiterentwicklung dieses Modells wird in Kapitel 4 detailliert vorgestellt.

Steinbeck-Behrens [101] stellt ein Programm zur Berechnung der Trocknung auf Karosserien vor. Dabei wird ein bestehender Trockner durch eine mit Temperaturlaufnehmern bestückte, unlackierte Karosserie „kalibriert“, also transient der Temperaturverlauf bei der Trocknerdurchfahrt aufgezeichnet. Diese Temperaturen werden als Randbedingungen für ein Wärmeleitungsmodell verwendet. Es kann somit die Temperaturverteilung auf der gesamten Karosserieoberfläche interpoliert werden. Das Modell ist für kleinere Trockner- oder Karosseriemodifikationen gültig.

Domnick et al. [26] stellen ein empirisches Fehlermodell als Teilprojekt im Rahmen des SiLat-Projektes [89] auf. Dabei werden Trocknungsparameter wie Anströmungsgeschwindigkeit und -temperatur mit einer experimentell bestimmten Fehlerrate korreliert. Das Modell ist allerdings nur in engem Rahmen auf andere Geometrien übertragbar.

Für die Auslegung von Sprühtrocknern präsentiert *Bellinghausen* [6] ein empirisches Trocknungsmodell. Dieses basiert auf experimentell erfassten Trocknungsgeschwindigkeiten von luftumströmten Tropfen im Levitator bei Temperaturen von 80 °C.

Farkas und Rendik [31] schlagen ein Modell zur Berechnung von geschichteten landwirtschaftlichen Gütern vor. Hierbei handelt es sich zwar nicht um eine Filmtrocknung, jedoch sind die Vorgehensweise bei der Diskretisierung des Simulationsgebietes und die verwendeten Transportgleichungen ähnlich zu dem in Kapitel 4 vorgestellten Modell. Zur Lösung des aufgestellten Gleichungssystems wird *Matlab-Simulink*² verwendet.

2.2. Experimente zur Filmtrocknung

Bei den experimentellen Untersuchungen zur Filmtrocknung kann zwischen integralen und lokalen Untersuchungen unterschieden werden. Integrale Untersuchungen befassen sich mit der Erfassung von Daten bei der Trocknung einer Region. Dies ist beispielsweise die Gewichtsabnahme eines Probebleches bei lokal unterschiedlichen Strömungsbedingungen. Obwohl die Trocknung und damit der verdunstende Massenstrom aus dem Film örtlich unterschiedlich verläuft, wird nur die Gewichtsabnahme der gesamten Probe erfasst. Lokale Untersuchungen erfassen die Trocknung nahezu punktuell. Beispielhaft ist hier die Schichtdickenabnahme mit der chromatisch-konfokalen Abstandsmessung (Kapitel 3.7) zu nennen.

2.2.1. Integrale Untersuchungen

Saure et al. [85] messen mit einem FTIR Spektrometer den Feuchtegehalt eines Films auf einer Aluminiumplatte mit den Maßen 30 mm · 60 mm. Unter Variation der Luftge-

¹Kommerzielle Software zur Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) der Firma ANSYS, Darmstadt

²Software zur numerischen Simulation, Firma MathWorks, Ismaning, Software-Version R2008a

schwindigkeit (0,05 m/s ... 0,7 m/s) und der Trocknungstemperatur (25 °C und 40 °C) in einem Kanal mit dem quadratischen Querschnitt der Kantenlänge von 142 mm werden Trocknungsversuche durchgeführt. Der aufgebrachte Film besteht aus den binären Lösungen Methanol-Polyvinylacetat und Benzen-Polyvinylacetat sowie deren ternärem Gemisch. Die experimentell ermittelten Daten werden mit durchgeführten Simulationen verglichen. Dabei wird festgestellt, dass der Diffusionskoeffizient stark von Temperatur und Lösemittelkonzentration im Film abhängt. Direkt unter der freien Filmoberfläche ist der Diffusionskoeffizient bedingt durch die Austrocknung des Films verringert, was zu einer Erhöhung der Trocknungsdauer führen kann. Eine Gegenmaßnahme besteht in der Zugabe eines weiteren Lösemittels in den Film, welches die Verdunstung begünstigen kann. *Schabel et al.* [87] bestätigen diese Aussage durch lokale Untersuchungen im Film. Die Luftgeschwindigkeit wird als nicht maßgeblich für den Trocknungsverlauf im zweiten Trocknungsabschnitt identifiziert.

In Versuchen zur konvektiven Trocknung von gelatinebeschichteten Plättchen misst *Gehrmann* [35] den Einfluss von Feuchtigkeit, Temperatur und Anströmgeschwindigkeit auf die Trocknung. Als Substratträger verwendet er quadratische Glasplättchen mit einer Kantenlänge von 49 mm, die mittig in eine Messzelle in einen geschlossenen Umlufttrockner eingelegt werden. Er bestimmt integral die Gewichtsabnahme der Proben durch die Trocknung mit einer Waage, die er gegenüber induzierten Schwingungen aus der Umluftströmung mit einem Ölbad dämpft. Weiterhin führt er Sorptionsversuche zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten mit Hilfe der Sorptionskinetik durch.

Skuhr [96] misst die Trocknung von akustisch levitierten Gemischtröpfen und variiert Anströmungsgeschwindigkeit und -feuchtigkeit sowie die Tropfengröße und Zusammensetzung des Gemisches. Er untersucht unter anderem auch die Trocknung des in dieser Arbeit verwendeten Modelllacksystems bestehend aus Butylglykol, Wasser und Polyurethan. Für das Modelllacksystem gibt er konzentrations- und temperaturabhängige Polynome zur Berechnung des Diffusionskoeffizienten an, die er aus experimentellen Daten und einem Trocknungsmodell bestimmt. Die Diffusionskoeffizienten werden auch von *Schröder* und *Geipel* zur Modellierung der Trocknung verwendet.

Schröder [93] appliziert industriell eingesetzte Real- und ternäre Modelllacksysteme auf ebene Probebleche mit einem pneumatischen Lackierroboter. Die Probebleche bestehen aus Stahl und sind mit KTL beschichtet. Unmittelbar nach der Lackapplikation werden die Probebleche in die Messzelle eingelegt. Dabei schließt die Oberfläche des auf eine Waage aufgelegten Bleches bündig mit der Kanalwand an der Unterseite der Messzelle ab. Es werden Parameterstudien bezüglich des Einflusses von Trocknungslufttemperatur, -feuchtigkeit und -geschwindigkeit durchgeführt. Nach Abschluss der Trocknung wird die Trockenschichtdicke mit einer NC-Linearverfahreinheit an bestimmten Stellen gemessen. Neben Versuchen mit einer Lackschicht führt *Schröder* auch Versuche zur Nass-in-nass-Applikation von zwei Schichten durch. Die Ergebnisse der Experimente werden erfolgreich mit dem oben vorgestellten Modell verglichen.

Geipel [36] [37] modifiziert die von *Schröder* aufgebaute Versuchsanlage. Er ersetzt die Messzelle durch einen Aufbau, in dem ein ebenes Blech auf einer Waage mittig in der Strömung gehalten wird. Außerdem wird in die Kanalwand ein Pyrometer eingebaut, das die Temperatur der nicht-beschichteten Seite des Probebleches misst. Die organischen Bestandteile in der Abluft werden mit einem FTIR-Analysator detektiert. Ein zweiter Trocknungskanal ermöglicht eine Zwischentrocknung unter definierten Bedingungen für Zweischichtversuche. Die mit einer 20 µm KTL-beschichteten Probebleche haben eine Größe

von 126 mm · 200 mm und eine Stärke von 0,8 mm. In der vorliegenden Arbeit wird die Messzelle von *Geipel* im Grundprinzip für die Parallelströmversuche beibehalten.

Ondratschek et al. [71] präsentieren Untersuchungen zur Trocknung wasserbasierter Real-lacksysteme an Luft bei ebener Anströmung unter Variation der Parameter Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur. Die Massenabnahme des Versuchskörpers wird gravimetrisch erfasst. Die Temperatur wird in den Versuchen bis 60 °C variiert. Die Kombination eines entfeuchteten, erwärmten Luftstromes, der über das zu trocknende Gut streicht, wird als optimales Trocknungsverfahren bezüglich einer kurzen Trocknungszeit identifiziert.

Hecht [43] führt bei der BASF AG in Münster Trocknungsversuche in einem Ofen Typ Hygrex LBT 2500 der Firma Hellman-Hygrex durch. Die experimentell ermittelten Daten vergleicht er mit Simulationsergebnissen und erzielt eine gute Übereinstimmung. *Blanke* [8] nutzt die Aufheizversuche aus dem Hygrex-Trockner zur Verifikation durchgeführter Simulationen bezüglich des Aufheizverhaltens von dünnen Blechen in einer Prallanströmung. *Hecht* misst weiterhin die Trocknung von ebenen, parallel angeströmten Probeblechen an dem in Kapitel 3 beschriebenen Versuchsstand. Das bei den Versuchen und der Simulation verwendete wasserbasierte Modelllacksystem wurde auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Rösler et al. [81] messen die Verdunstungszahlen und Verdunstungsgeschwindigkeiten von in Wasserlacken verwendeten Lösemitteln unter Infrarotbestrahlung. Die Messungen erfolgen sowohl gravimetrisch als auch bezüglich der einzelnen Komponenten mittels eines Photoionisationsdetektors [50]. Weiterhin werden die Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit in der Klimakammer, in dem sich der Versuchsaufbau befindet, variiert. Die Temperatur der 200 mm · 250 mm großen Probebleche wird auf der lackierten Seite mit einem Pyrometer gemessen. Im Vergleich zur reinen Konvektionstrocknung ermitteln *Rösler et al.* einen um den Faktor 3 ... 5 erhöhten Stoffübergangskoeffizienten. Strahlung kann also bei der Berechnung von Trocknungsvorgängen nicht vernachlässigt werden. Daher wird auch im Rahmen dieser Arbeit die Strahlung in einem Konvektionstrockner berücksichtigt.

2.2.2. Lokale Untersuchungen

Schabel et al. [87] führen eine direkte Messung des Konzentrationsprofils verschiedener Lösemittel in einer binären Polymerlösung durch. Dazu verwenden sie die inverse Mikro-Raman-Spektroskopie. Das Aufzeichnen der transienten Konzentrationsänderung ermöglicht die Berechnung von Diffusionskoeffizienten und Aktivitäten. Die Überströmgeschwindigkeit wird zwischen 0,1 ... 0,75 m/s, die Temperatur der Lösung zwischen 20 ... 60 °C sowie die initiale Schichtdicke zwischen 40 ... 100 µm variiert. Die Messzelle ist so beheizt, dass die Lösung auf einer Glasplatte über den Trocknungsverlauf isotherm gehalten werden kann. Die Anwendbarkeit der inversen Mikro-Raman-Spektroskopie beschränkt sich auf transparente Filmsysteme. Als Polymerlösungen werden daher Polyvinylacetat mit Methanol oder Toluol verwendet. *Schabel* [86] erweitert schließlich die Messungen auf ternäre Systeme. *Krenn et al.* [54] trocknen das binäre Gemisch Toluol-Polyvinylacetat in einem reinen bzw. mit Methanol beladenen Stickstoffstrom. Bei der Trocknung mit reinem Stickstoff erfolgt an der freien Oberfläche des Films eine Hautbildung („Skinning“). In diesem Bereich der getrockneten Haut fällt der Diffusionskoeffizient für das Lösemittel um mehrere Dekaden und behindert somit den Austritt weiteren Lösemittels aus dem Film. Bei der

Zugabe von Methanol in den Stickstoffmassenstrom kann die Trocknung beschleunigt und Hautbildung vermieden werden.

Geipel [36] misst mittels der Magnetresonanztomographie (*en.* Magnetic Resonance Imaging, MRI) an der von *Glover et al.* entwickelten Messapparatur GARField (Gradient At Right Angle to the Field) der Universität of Surrey die Filmtrocknung auf quadratischen Glasobjektträgern der Kantenlänge von 18 mm. Dabei wird der auch in dieser Arbeit verwendete wasserbasierte Modelllack eingesetzt und mit einem Rakel appliziert. Da die Protonendichte von Wasser und Butylglykol eine ähnliche Signalintensität erzeugen, kann bei den Messungen der Volumenanteil der flüssigen Löse- bzw. Dispersionsmittel in der Lackschicht ab einer bestimmten Restfeuchte gemessen werden. Die Auflösung in Schichtdickenrichtung beträgt 10 μm . Bei seinen Messungen beobachtet *Geipel* Hautbildung an der Lackoberfläche sowie Rückdiffusion und Schichtquellung bei Zweischichtsystemen nach einer Zwischentrocknung der zuerst applizierten Schicht. Die Trocknung erfolgte bei Umgebungstemperatur im Messaufbau des MRI. Bei Messungen mit höheren Temperaturen wurden die Proben außerhalb der Messzelle des MRI getrocknet und zur Konzentrationsbestimmung in die Messzelle eingelegt. *Gorce et al.* [40] führten Messungen an unterschiedlichen Emulsionen an der Messapparatur GARField durch. Wie *Schabel* oder *Krenn* stellen sie ebenfalls eine Hautbildung an der freien Lackoberfläche fest.

Ko [53] verwendet die MRI Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes von Polyoxymethylenproben nach einer mechanischen Beanspruchung. Mittels der Messung der Konzentration von eingelagertem Wasser kann er beschädigte Bereiche in Bauteilen detektieren. Die Trocknung von Lebensmitteln wird von *Regier et al.* [74] in einem Konvektionstrockner unter Verwendung der MRI-Methode gemessen. Mit einer räumlichen Auflösung von 0,25 mm/Pixel wird quantitativ der Wassergehalt in der Probe bestimmt. Eine Messung der lokalen Temperaturverteilung durch die Auswertung der thermisch induzierten chemischen Verschiebung der Resonanzfrequenz des Wassers konnte allerdings zunächst nicht zufriedenstellend realisiert werden.

Mintzlauff beschreibt in mehreren Arbeiten [64] [66] [67] experimentelle Untersuchungen zur Dispersionstrocknung von wasserbasierten Lacken auf Papierbahnen. Dabei untersucht er sowohl die Konvektionstrocknung wie auch die Infrarottrocknung und studiert in Parametervariationen den Einfluss von Lackmenge, Trocknungsluftmassenstrom und -temperatur, Düsengeometrie und unterschiedlicher Wellenlänge des Infrarotstrahlers. Während der Trocknung erfasst er die Temperatur mit einem Pyrometer. Die Feuchtigkeit der Papierbahn wird an der Oberfläche mit einem Reflexionsphotometer gemessen. Außerdem führt er Messungen zur Bestimmung der Fugazitäten von Wasser im Papierfilm anhand von Sorptionsversuchen durch. Aufgrund der Versuche schlägt er in [65] genanntes Trocknungsmodell vor (siehe auch Kapitel 2.1.1, Seite 10).

Kunkel und Schulze [59] stellen ein Verfahren zur berührungslosen Schichtdickenmessung bzw. Abstandsmessung mit einem chromatisch konfokalen optischen Messaufbau vor. Das Verfahren eignet sich ebenfalls zur berührungslosen Abtastung von Oberflächen und wurde im Rahmen dieser Arbeit angewendet (Kapitel 3.7).

Döring et al. [28] messen berührungslos mittels Luftultraschall die Trocknung eines Modelllackfilms. Dabei wird das auch in dieser Arbeit verwendete ternäre Wasser-Butylglykol-Polyurethan Gemisch auf Probebleche mit einem Rakel appliziert und anschließend bei Umgebungsbedingungen getrocknet.

Die Vernetzung eines Lackfilms misst *Knappe* [51] mittels dielektrischer Analyse. Die Probe steht dabei in direktem Kontakt zu zwei Elektroden, von denen die eine mit einem

sinusförmigen Eingangssignal beaufschlagt wird. Über Phasenverschiebung und Amplitudenabschwächung kann auf die Ionenviskosität und somit auch auf den Vernetzungsgrad, zurückgeschlossen werden. Im Gegensatz zum Luftultraschall ist bei der dielektrischen Analyse eine direkte Kontaktierung der Lackschicht mit den Elektroden erforderlich.

3. Experimentelle Untersuchungen

Um einen transienten Trocknungsvorgang experimentell zu erfassen, wurde eine bestehende Labor-Trocknungsanlage umgebaut und erweitert. Dies umfasste insbesondere die Strömungsführung sowie die verwendete Messtechnik. Die generische Versuchsanlage ist so aufgebaut, dass die an der Messzelle vorherrschenden Bedingungen bekannt sind und damit in einer Simulation als Randbedingungen (z.B. Wandtemperaturen) vorgegeben werden können. Damit können die Versuchsergebnisse direkt mit den Daten aus der Simulation verglichen werden. Bei den Versuchen können sowohl die Probengeometrie als auch die Art und Parameter der Anströmung variiert werden. Unter Parametern der Anströmung werden die Bedingungen der Trocknungsluft verstanden. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über deren Variationsbereich.

Lufttemperatur [°C]	Luftgeschwindigkeit [m/s]	Luftfeuchtigkeit [g/kg _{tr.Luft}]
25; 50; 60; 70 ; 80; 140	0,5; 1,0 ; 2,0; 10	6 ; 10; 15

Tabelle 3.1.: Variation der Trocknungsparameter am Einlass der Messzelle

Als Standardversuch wurde die Parameterkombination $t_{LU} = 70\text{ °C}$, $v_{LU} = 1\text{ m/s}$ und $X_{LU} = 6\text{ g/kg}_{tr.LU}$. Diese Werte orientieren sich an den Bedingungen bei der Zwischentrocknung in einer Trocknungsanlage¹ in der industriellen Praxis.

Bei den Versuchen wird zwischen dem **Aufheizversuch** und dem **Trocknungsversuch** unterschieden. Im Gegensatz zum Aufheizversuch wird beim Trocknungsversuch auf die verwendeten Probebleche Lack appliziert. Folglich stellt sich beim Aufheizversuch kein Temperaturhaltepunkt bedingt durch einen verdunstenden Lösemittelmassenstrom ein. Aufheizversuch und Trocknungsversuch wurden für jede Parametervariation der Trocknungsbedingungen durchgeführt. Bei allen Versuchen wird der transiente Temperaturverlauf des Probebleches erfasst. Die so ermittelten Daten aus der Aufheizsimulation werden zur Verifikation des numerischen Verfahrens und der Diskretisierung des Rechengebietes verwendet. Bei den Trocknungsversuchen werden zusätzlich gravimetrisch der Gewichtsverlauf sowie spektrometrisch der organische Lösemittelgehalt in der Abluft gemessen und mit den Ergebnissen aus der Trocknungssimulation verglichen [12].

3.1. Versuchsaufbau

Die Art der Anströmung des Probeblechs in der Messzelle kann durch einen Umbau der An- und Abströmkanäle variiert werden. Beim Parallelströmversuch wird ein Probeblech mittig in die Messzelle eingelegt. Das Probeblech liegt in der Messzelle auf vier mit einer Waage

¹Obleich in Durchlauftrocknern in der Automobilindustrie (Kapitel 6.1) die Düsenaustrittsgeschwindigkeit an den Lufteinlässen 10 m/s und mehr betragen kann, ist die sich im Trockner einstellende Geschwindigkeit im Mittel wesentlich geringer und in etwa von der Größenordnung 1 m/s

verbundenen Stangen auf. Kunststoffkappen aus Polytetrafluorethylen isolieren das Blech thermisch von den Stangen. Eine ausgebildete Rohrströmung tritt in die Messzelle ein. Das Probeblech ist waagrecht in der Messzelle parallel und längs zur Strömungsrichtung ausgerichtet (Abbildung 3.1a).

Die Messzelle wurde aus einem Aluminiumrechteckhohlprofil mit den Abmaßen $b \cdot h = 180 \text{ mm} \cdot 80 \text{ mm}$ und einer Wandstärke von 4 mm gefertigt. Der freie Anströmungsquerschnitt hat daher die Abmaße $b \cdot h = 172 \text{ mm} \cdot 72 \text{ mm}$.

Durch Einsetzen von Kunststoffkappen unterschiedlicher Höhe kann ein Z-förmiges Probeblech so in die Messzelle eingelegt werden, dass die Schenkel des Z-Blechs wiederum parallel zur Strömung ausgerichtet sind. Auf die Oberseite des Bleches wird im Trocknungsversuch Lack appliziert. Je nach Ausrichtung des senkrecht ausgerichteten Steges des Z-Bleches wird bezüglich der Blechoberseite zwischen einem „backward-facing step flow“ (Abbildung 3.1b) und einem „forward-facing step flow“ (Abbildung 3.1c) in Anlehnung an Šarić [82] unterschieden.

Die Oberseite der Messzelle kann bei den Parallelströmungsversuchen durch eine infrarotdurchlässige Scheibe der Firma *Robax* ersetzt werden. Damit kann der Einfluss eines zusätzlichen Infrarotstrahlers auf die Trocknung untersucht werden, wie in Abbildung 3.1d schematisch gezeigt.

Alternativ kann statt eines Infrarotstrahlers auch eine CCD- oder Infrarotkamera oberhalb der Messzelle montiert werden. Bei den Versuchen mit Infrarotkamera wird der Bereich oberhalb der Messzelle mitsamt dem Infrarotkameraobjektiv in ein separates Gehäuse integriert, um den Einfluss von Streustrahlung zu vermindern (Abbildung 3.1e).

Um die Trocknung in einer Prallströmung zu messen, kann nach *Shevchuk* [98] an der Oberseite der Messzelle ein Anströmungskanal mit dem freien Querschnitt $172 \text{ mm} \cdot 72 \text{ mm}$, entsprechend dem Querschnitt in Parallelströmung der Messzelle, angeschlossen werden (Abbildung 3.1f). Oberhalb des Anschlusses können verschiedene Einlassgeometrien eingesetzt werden. Dies sind neben einem Wabenfilter mit der Wabenweite 4 mm eine Einzellochdüse und ein Schlitzdüsenfeld. Loch- und Schlitzdüsenfeld sind so ausgelegt, dass 90 % des Kanalquerschnitts verdeckt werden. Damit werden mittlere Einlassgeschwindigkeit bis zu 10 m/s erreicht. An der Kanalunterseite werden an der Messzelle zwei Auslassstutzen befestigt. Die Seiten der Messzelle in Richtung der Parallelströmung werden dabei mit Blechen verschlossen.

Abbildung 3.2 zeigt den kompletten Versuchsaufbau für die Messzelle bei Parallelströmungsversuchen. Umgebungsluft wird von einem Gebläse durch einen Luftfilter in die Anlage gesaugt. Über ein Ventil wird der gewünschte Luftvolumenstrom eingestellt. Durch eine Kälteanlage und eine Rieselkolonne mit einem temperierten Wassermassenstrom wird der Wassergehalt der Trocknungsluft eingestellt und unmittelbar nach der Rieselkolonne mit einem kapazitiven Feuchtesensor der Firma *Vaisala* gemessen. Anschließend wird die Trocknungsluft durch eine elektrische Widerstandsheizung auf die gewünschte Temperatur erwärmt. Nach einem Strömungsgleichrichter, bestehend aus verschiedenen Wabenfiltern und einem 1,5 m langen Kanal, strömt die Trocknungsluft durch die Messzelle² und in einen 0,5 m langen Auslasskanal. In der Messzelle wird vor bzw. hinter dem Probeblech die Temperatur der Trocknungsluft erfasst. Die Strömungsgeschwindigkeit wird in dem anschließenden Kanal mit einem Flügelradanemometer der Firma *Höntzsch* gemessen. Weiterhin werden in diesem Kanal Druck und Temperatur zur Berechnung des Normvolumenstroms be-

²Das Volumen der Messzelle beträgt $l \cdot b \cdot h = 475 \cdot 172 \cdot 72 \text{ mm}^3 = 5,88 \text{ dm}^3$ und wird durch zwei Wabenfilter in Strömungsrichtung begrenzt.

3. Experimentelle Untersuchungen

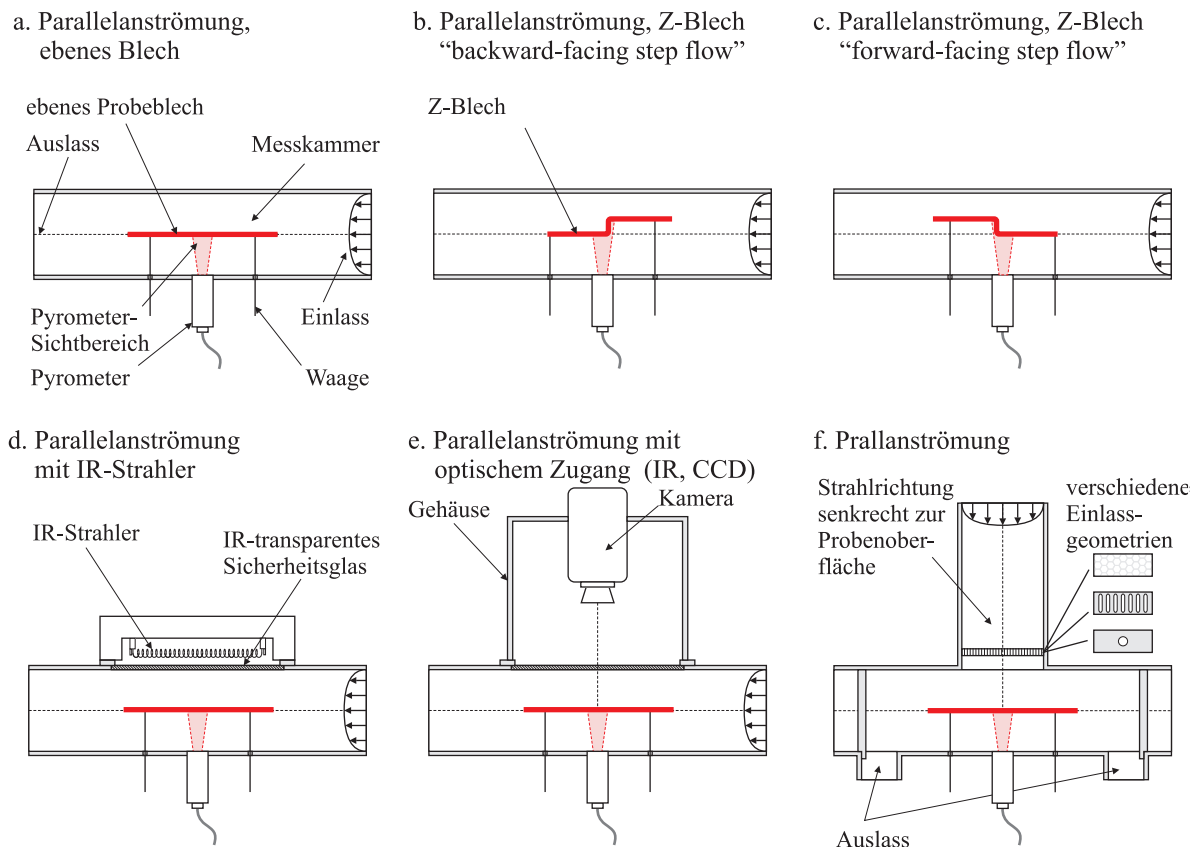


Abbildung 3.1.: Konfigurationen der Messzelle

stimmt. Ein Teilmassenstrom wird anschließend für die Messung der organischen Lösemittel in der Trocknungsluft mittels Fourier-Transformation-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) der Firma *Ansyco* entnommen bzw. zurückgeführt. Die Abluft wird anschließend aus dem Labor abgeleitet. Alle Anlagenkomponenten werden untereinander mit Aluminium-Flexrohr mit 100 mm Nenndurchmesser verbunden und gegebenenfalls isoliert. Dazu wird eine 25 mm starke, außenseitig aluminiumkaschierte Thermo-E-Glasnadelmatte der Firma *HKO* im Bereich der Messzelle und der Strömungshomogenisierung verwendet. Zur Kompensation der Wärmeverluste sind im Bereich von Strömungsgleichrichter und der Messzelle elektrische Widerstandsheizschleifen der Firma *Eltherm* zwischen Kanalaussenwand und Isolation flächig aufgelegt. Damit kann von einer weitestgehend konstanten Wandtemperatur, die entsprechend der Anströmungstemperatur gewählt wird, ausgegangen werden.

Die Versuchsumgebung bei Prallströmungsversuchen gleicht der Peripherie bei Parallelströmungsversuchen. Der freie Kanalquerschnitt des Parallelströmungskanal wird mit isolierten Klappen verschlossen. An der Oberseite der Messzelle wird der 1,1 m lange Strömungsgleichrichter angeschlossen. Im Strömungsgleichrichter sind weiterhin zur Homogenisierung der Strömung mehrere Wabenstrukturen unterschiedlicher Wabenweite angebracht. Die Wände sind wie bei den Parallelströmungsversuchen elektrisch beheizt.

Für Zweischichtversuche mit unterschiedlichen Trocknungsbedingungen für die Lackschichten, wie beispielsweise bei einem Basislack-Klarlackaufbau, ist an der Anlage ein zweiter Trocknungskanal vorhanden. In diesem kann ein Probeblech bei einer parallelen Anströmung getrocknet werden (Abbildung 3.1a). Im Gegensatz zur Messzelle im ersten Trock-

nungskanal ist in der Messzelle des zweiten Kanals keine gravimetrische oder thermische Messung der Trocknung möglich. Ferner wird die Luftfeuchte nur im ersten Kanal geregelt. Die Luftfeuchte im zweiten Kanal ist ungeregt und liegt in einem Bereich von $< 2 \text{ \%}_{\text{r.F.}}$ bei einer Lufttemperatur $t_{LU} = 140 \text{ °C}$.

Abbildung 3.4 zeigt den kompletten Messaufbau für Prallströmungsbedingungen. Die meisten Anlagenkomponenten wurden in ein Rahmengestell der Firma *Item* montiert. Nicht abgebildet sind das Gebläse zur Erzeugung des Luftvolumenstromes sowie die Ventile zur Luftstromregulierung.

3.2. Messtechnik

Die Datenerfassung an der Laboranlage erfolgte über eine Datenerfassungskarte *PCI 6289* von *National Instruments* sowie mehrere serielle Schnittstellen. Die Daten wurden über die graphische Programmierungsumgebung *Labview*³ aufbereitet und gespeichert. Neben der Messwerterfassung erfolgte auch die Regelung einzelner Komponenten der Anlage über *Labview*, wie beispielsweise die Ansteuerung des Infrarotstrahlers.

3.2.1. Temperaturen

Die Temperaturen wurden mit Ausnahme der Blechtemperatur und einiger Kontrollthermoelemente zur Anlagenregulation sowie der Widerstandsthermometer in den Feuchtesensoren (Typ PT 100) mit Mantelthermoelementen vom Typ K der Firma *Electronic Sensor* gemessen. Der Aussendurchmesser der Thermoelemente betrug 0,5 mm. Die Thermoelemente wurden mit ihrer Thermoleitung vom Typ K in einem Bereich von 5...145 °C kalibriert. Die Datenerfassung erfolgte über einen 32-Kanal-Signalverstärker *SCXI 1102* von *National Instruments*. Der zugehörige Terminal-Block *SCXI 1303* verfügt über eine Kaltstellenkompensation. Die Genauigkeit der Temperaturmessungen mit den Thermoelementen beträgt $\pm 0,5 \text{ °C}$.

Zur Bestimmung der Temperatur des Probebleches an der Unterseite wird ein Pyrometer der Firma *Heitronics* vom Typ *KT.11K6* verwendet. Die Genauigkeit wird mit $\pm(1 \% + 1,5 \% \cdot |T_U - T_M|)$ angegeben. Bei einer Umgebungstemperatur von $T_U = 20 \text{ °C}$ und einer Messobjekttemperatur von $T_M = 80 \text{ °C}$ ergibt sich somit ein Fehler von $\pm 1,9 \text{ \%}$ bzw. $\pm 1,5 \text{ °C}$. Durch eine eigene Kalibrierung mittels Thermoelementen konnte die Genauigkeit auf $\pm 1 \text{ °C}$ gesteigert werden.

3.2.2. Luftgeschwindigkeit

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in der Messzelle erfolgt indirekt mit einem Flügelradanemometer *ZS 25* der Firma *Höntzsch* in einem eigenen, der Messzelle nachgeschalteten Kanal mit kreisförmigem Querschnitt des Durchmessers $d_i = 70 \text{ mm}$. Dieser hat eine Länge von $2,9 \text{ m} > 40 \cdot d_i$ im Vorlauf und $0,6 \text{ m} > 5 \cdot d_i$ im Nachlauf des Anemometers [23]. Eine Kalibrierung des Anemometers für den verwendeten Messkanal wurde von der Firma *Höntzsch* durchgeführt und ist in der Software des Gerätes hinterlegt. Über das Querschnittsflächenverhältnis kann somit die mittlere Luftgeschwindigkeit \bar{u}_{LU} in der

³Firma *National Instruments*, München, Software-Version 8.x

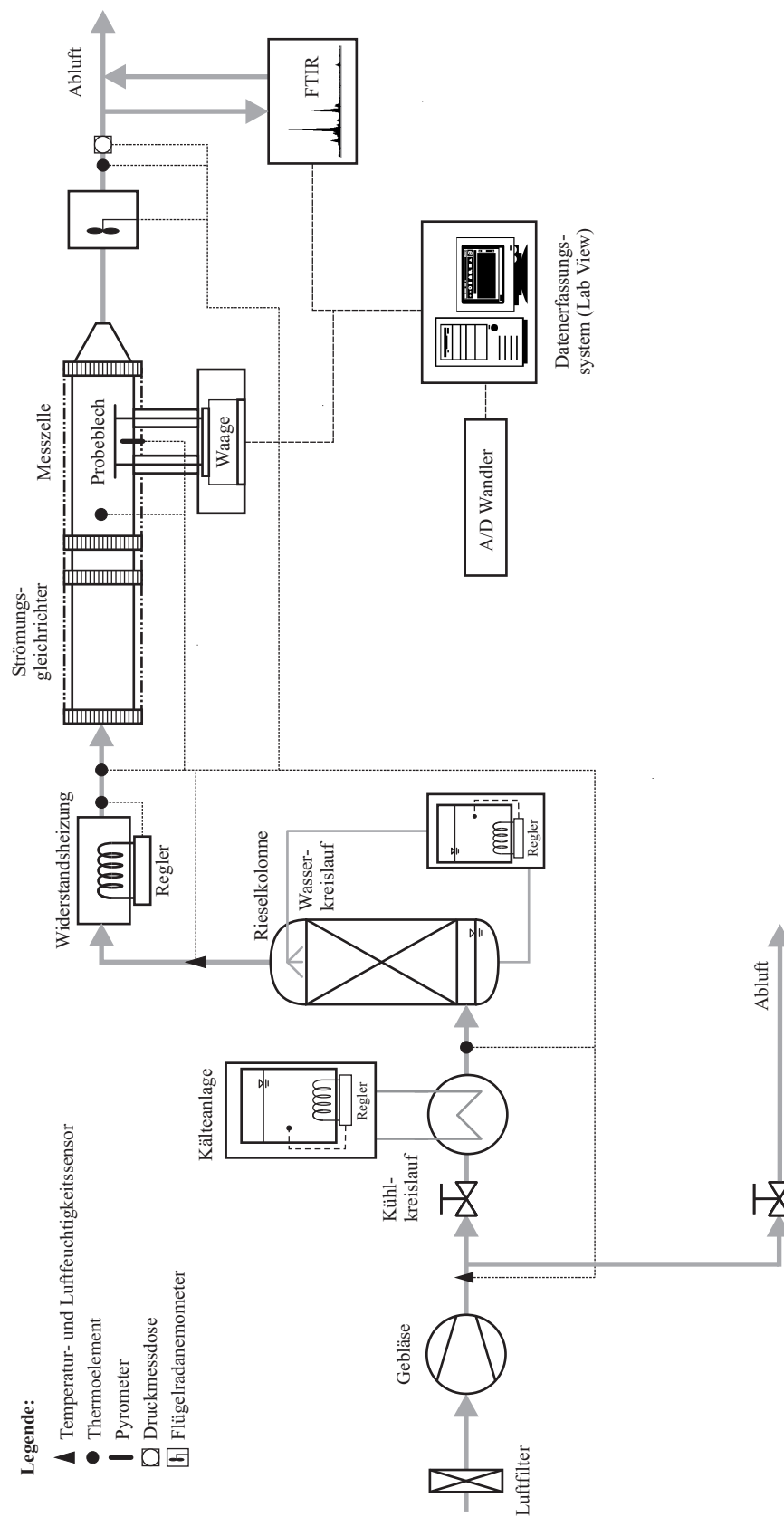


Abbildung 3.2.: Prinzipskizze der Labor-Trocknungsanlage für Einsichtversuche in Parallelströmung

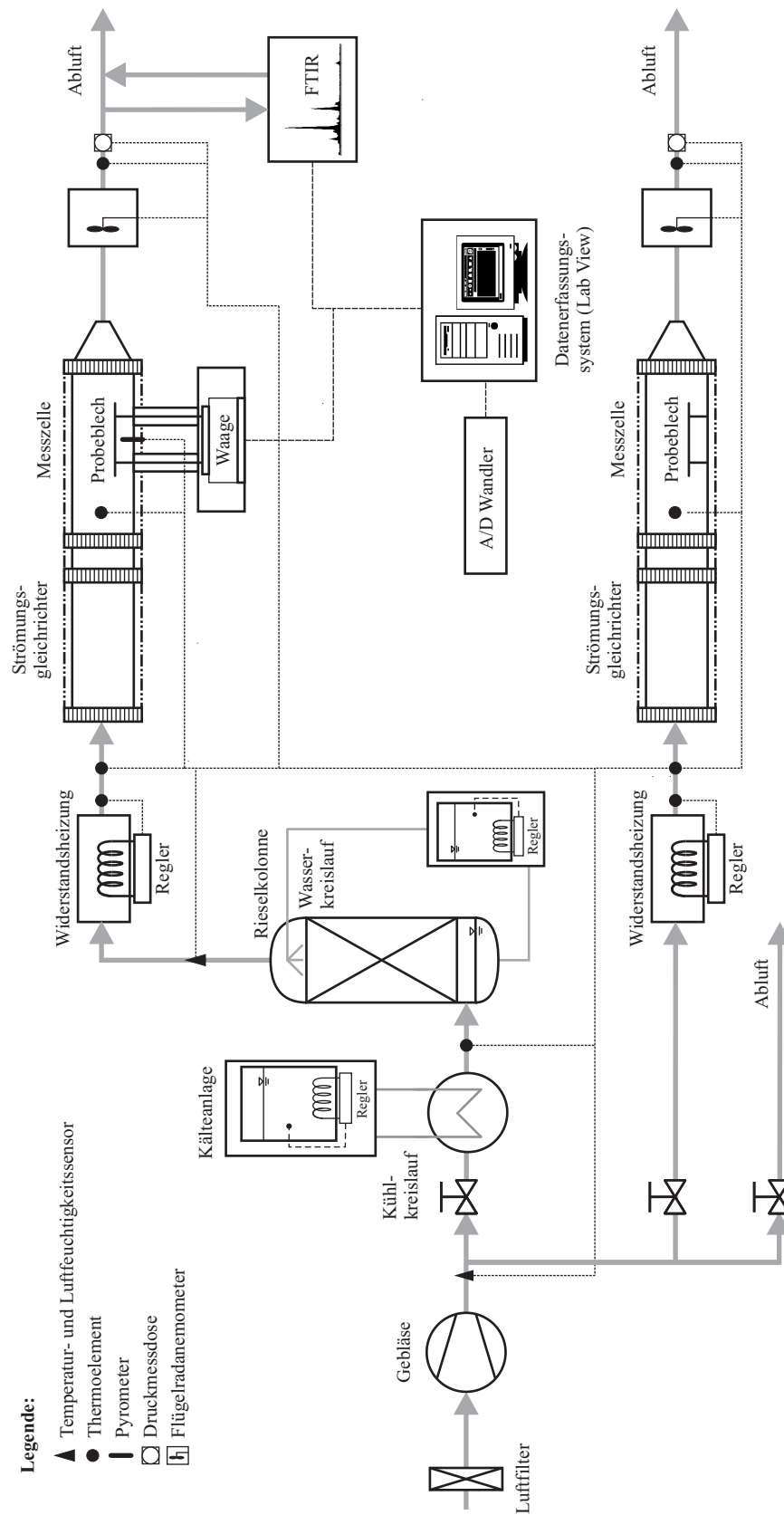


Abbildung 3.3.: Prinzipskizze der Labor-Trocknungsanlage für Zweischichtversuche in Parallelströmung

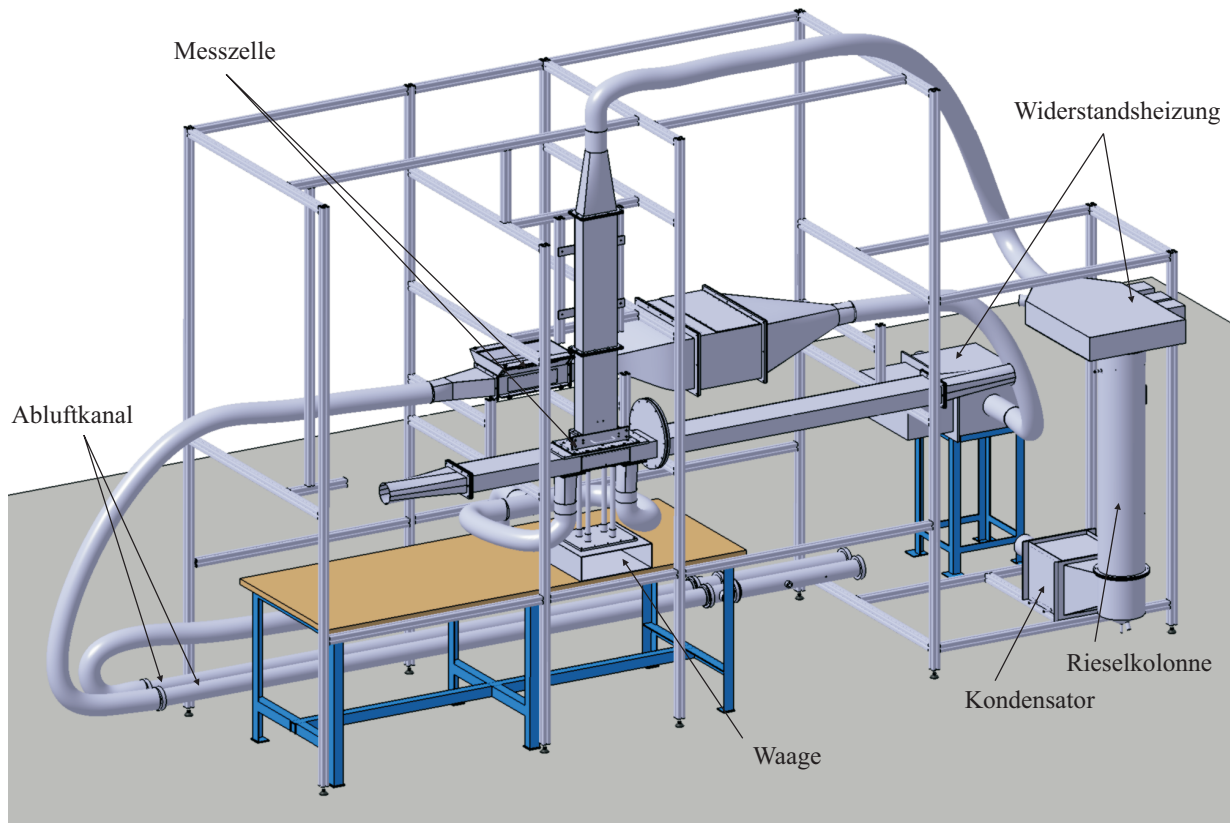


Abbildung 3.4.: CAD-Modell der Versuchsanlage

Messzelle berechnet werden. Flügelradanemometer bieten nach *Dolenc* [25] für Gasströmungen hohe Genauigkeiten. In diesem Fall wird die Messunsicherheit des verwendeten Sensors insgesamt mit $\pm 0,5\%$ angegeben.

3.2.3. Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit wurde mit kapazitiven Sensoren der Firma *Vaisala* vom Typ *HMP 233* gemessen. Der Fehler der Sensoren beträgt nach einer zertifizierten Kalibrierung durch *Vaisala* weniger als $\pm 2\%$ bei einer Lufttemperatur von $T_{LU} = 25\text{ °C}$. Daraus ergibt sich ein Fehler der absoluten Luftfeuchtigkeit von weniger als $\pm 0,4\text{ g/kg}_{\text{tr.LU}}$ für eine absolute Luftfeuchtigkeit $X_{LU} = 6\text{ g/kg}_{\text{tr.LU}}$ und einer Lufttemperatur $T_{LU} = 25\text{ °C}$ bei einem Luftdruck von $p_{LU} = 1013,25\text{ mbar}$. Die Messung der Luftfeuchtigkeit erfolgt nach der Rieselsäule bei Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur.

3.2.4. Lackmasse

Im Trocknungskanal ist eine Waage der Firma *Precisa* vom Typ *808 M SCS* eingebaut. Diese misst während der Trocknung die Massenabnahme der Probe. Die Genauigkeit der Waage beträgt nach der Herstellerangabe $\pm 1\text{ mg}$. Die Strömung erzeugt im Prallanströmversuch sowie im Parallelströmversuch bei nicht idealer paralleler Ausrichtung des Probeblechs zu den Kanalwänden eine Kraft senkrecht zur Probeblechoberfläche. Weiterhin kann die Waage nicht vollständig gegen die Anströmungstemperatur, insbesondere bei hohen Trocknungslufttemperaturen, isoliert werden. Um eine Messwertverfälschung zu kompensieren,

wurde daher das Gewicht des Probebleches vor und nach der Trocknung mit einer zweiten Waage der Firma *PESA* vom Typ *XTop 620M SCS* bestimmt. Die Genauigkeit der Waage beträgt nach Herstellerangabe ebenfalls ± 1 mg. Über eine lineare Korrekturfunktion wird dann die gemessene Massenabnahme berichtigt.

Die Waage im Trocknungskanal verfügt über eine interne Schwingungskompensation, mit der Schwingungen infolge der Anströmung teilweise ausgeglichen werden können. Durch die Massenabnahme kann die Waage insbesondere im ersten Trocknungsabschnitt allerdings keinen stabilen Wert für die Masse ermitteln. Damit "springt" die Waage treppenartig, die Gesamtgenauigkeit der Messungen liegt daher im Prallströmversuch im ersten Trocknungsabschnitt bei ± 50 mg. Im zweiten Trocknungsabschnitt verringert sich mit annehmenden Massegradienten der Fehler der Waage zunehmend bis auf schließlich ± 30 mg bei einer Luftgeschwindigkeit von 1 m/s. Im Parallelströmversuch beträgt die Genauigkeit ebenfalls ± 30 mg bei einer Luftgeschwindigkeit von 2 m/s.

3.2.5. Organisches Lösemittel in der Abluft

Zur Messung der organischen Komponenten in der Abluft wurde ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) vom Typ *DX-2000* der Firma *Ansyco* verwendet. Mit einer Integrationszeit von 10 Hz wurde für jeweils 50 Spektren alle 5 s ein Messwert der Konzentration der organischen Komponenten Butylglykol, Kohlendioxid und Methan in der Abluft gemittelt und aufgezeichnet. Die Funktionsweise eines FTIR-Spektrometers wird im Rahmen dieser Arbeit nicht genauer erläutert. Eine genaue Erklärung des Messverfahrens geben beispielsweise *Mohn et al.* [69]. Die Kalibrierspektren für die einzelnen Komponenten wurden in Kooperation mit *Ansyco* erstellt. Dabei wurde in einen bekannten Stickstoffmassenstrom das zu kalibrierende Lösemittel aus einer Spritzenpumpe injiziert und verdunstet. Das Spektrum dieses Massenstromes wurde mit dem Spektrometer aufgezeichnet und als Kalibrierspektrum in der Messsoftware hinterlegt.

3.3. Probengeometrien

Abbildung 3.5 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten, lackierten Probengeometrien. Der Lack von Probeblech (a) wurde mit einem Filmziehrahmen appliziert, Probeblech (b) und (c) wurden mit dem 2-Achsen-Roboter sprühappliziert. Bei der Sprühapplikation der ebenen Bleche trifft der Sprühkegel senkrecht, bei der Z-förmigen Probengeometrie unter einem Winkel $\beta = 45^\circ$ auf die ebenen Flächen des Probeblechs auf.

Als Substrate werden Karosserie-Stahlbleche mit einer Wandstärke von 0,8 mm verwendet. Die beidseitig mit einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) beschichteten Bleche wurden von der *Daimler AG* in rechteckigen großen Blechtafeln mit den Kantenlängen 500 mm · 200 mm zur Verfügung gestellt und anschließend längs in rechteckige Probebleche mit den Abmaßen 110 mm · 200 mm aufgeteilt. Die Z-Bleche mit einer Breite von 110 mm, einer Stufenhöhe von 20 mm und einer daraus resultierenden Länge für die beiden Schenkel von 90 mm haben die gleiche Oberfläche. Die Bleche wurden mit einer Biegevorrichtung gebogen und anschließend in Kooperation mit der Fachhochschule *Esslingen* mit KTL beschichtet. Die KTL-Schichtdicke beträgt maximal 15 μm .

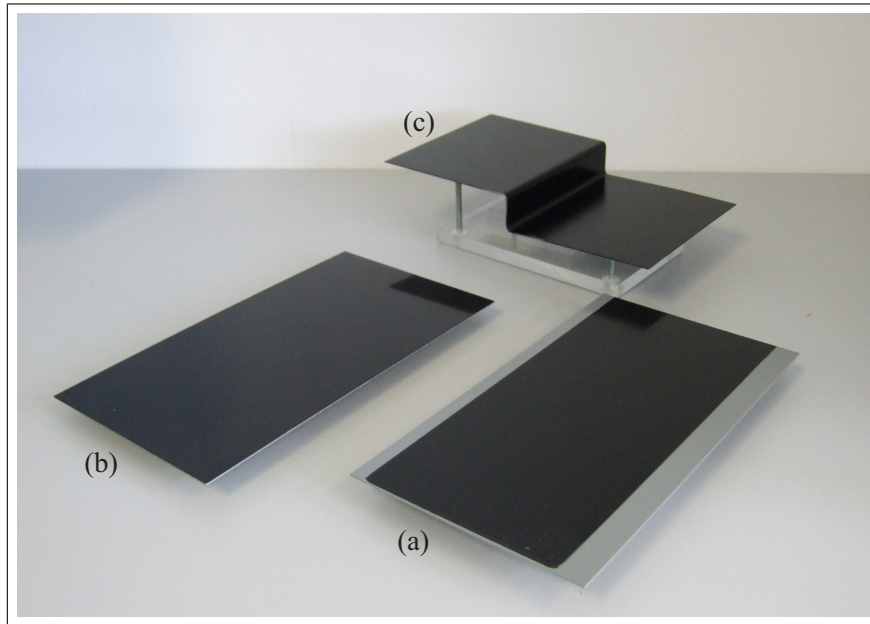


Abbildung 3.5.: Lackierte Probebleche

3.4. Lackapplikation

Zur Lackapplikation stehen grundsätzlich eine Vielzahl verschiedener Verfahren zur Verfügung [39]. An der Versuchsanlage sind folgende Verfahren verfügbar:

- pneumatische Sprühapplikation von Hand
- pneumatische Sprühapplikation mit einem 2-Achsen-Roboter
- Filmaufziehen von Hand mit einem Filmziehrahmen
- Filmaufziehen mit einem 3-Linearachsentsch

Die pneumatische Sprühapplikation von Hand ist für reproduzierbare Versuche nur bedingt geeignet und wurde nicht angewendet. Die pneumatische Sprühapplikation mit einem 2-Achsen-Roboter [44] wurde in einer Spritzkabine vom Typ 77 N/1 der Firma *Walther-Pilot* mit einer Luftabzugsleistung von $2600 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Reallacksysteme und das Modelllacksystem auf den Z-Blechen angewendet. Dabei wird das Probeblech auf eine Halterung horizontal in den Abzug eingelegt. Eine Abschirmung an der Unterseite vermeidet eine Beschichtung der Rückseite des Probebleches durch die Luftströmung. Damit wird einem Fehler in der Massen- und Temperaturmessung vorgebeugt. Die Automatik-Spritzpistole vom Typ WA 520ND der Firma *Walther-Pilot* wird so eingestellt, dass ein definiertes Nassschichtgewicht und damit eine gleichbleibende Nassschichtdicke erreicht wird. Die Sprühapplikation erfolgt in Blechlängsrichtung in vier Bahnen.

Für das Filmaufziehen von Hand, auch „Rakeln“ genannt, wurde ein Vierfach-Filmziehrahmen der Firma *Erichson* vom Modell 360 verwendet. Der Rahmen hat vier Spalthöhen (30, 60, 90 und $120 \mu\text{m}$) bei einer Filmapplikationsbreite von 90 mm. Bei der Applikation wurde das ebene Probeblech (3.6a (2)) in einen Halter (3.6a (1)) eingelegt, der eine seitliche Führung (3.6a (4)) des Filmziehrahmens (3.6a (3)) ermöglichte. Trotz dieser Führungshilfe schwankt die manuell applizierte Lackmenge stark. Dies ist auf unterschiedliche Geschwindigkeiten bei der Führung des Filmziehrahmens über das Blech

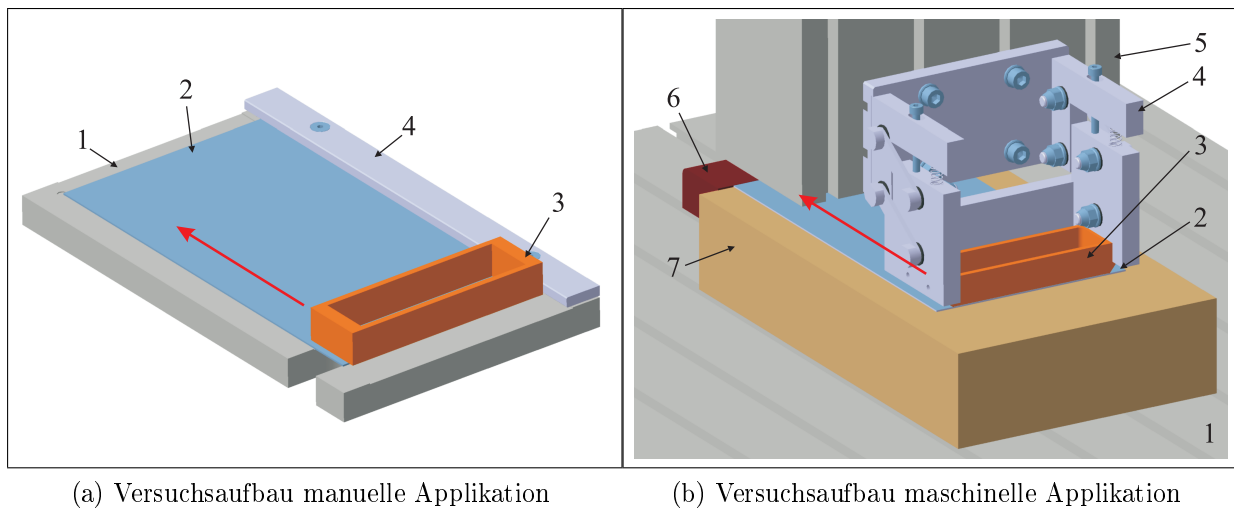


Abbildung 3.6.: Lackapplikation durch Rakeln

zurückzuführen. Abbildung 3.7a zeigt die applizierten Lackmengen bei einer Versuchsreihe mit acht Probanden. Jedem Probanden wurde die Applikation auf gleiche Weise erklärt, auf Wunsch konnten Probebleche zum Üben vor den eigentlichen Versuchen erstellt werden. Anschließend wurden drei Bleche von jedem Probanden mit Lack beschichtet und die aufgebrauchte Lackmasse gravimetrisch bestimmt. Im Mittel wurden über alle Versuche 1,206 g Lack appliziert, bei einer Standardabweichung von 0,244 g. Die Versuche zeigen zwar, dass je Proband zumeist eine gute Wiederholbarkeit gegeben ist. Dennoch ist die manuelle Applikation mit einem Filmziehrahmen für eine hohe, personenungebundene Reproduzierbarkeit ungeeignet.

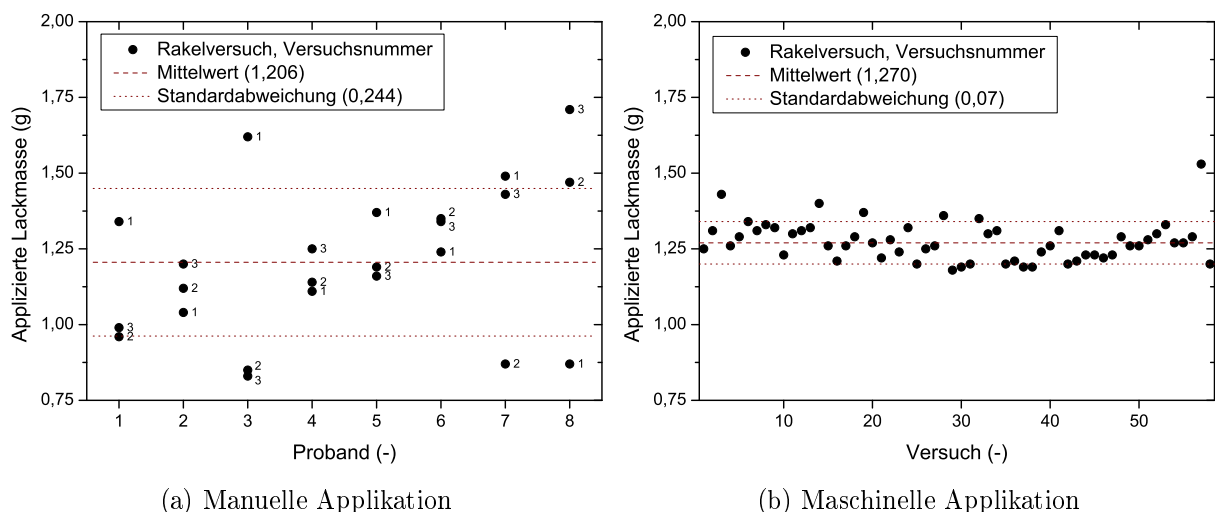


Abbildung 3.7.: Applikationsversuche

Daher wurde ein Aufbau zum Filmaufziehen mit einem 3-Linearachsensystem der Firma *Isel* realisiert (Abbildung 3.6b (1) und (5)). Das Probeblech besteht aus KTL-beschichtetem ferromagnetischem Stahl. Damit das Probeblech (3.6b (2)) während der Applikation fixiert

ist und gleichzeitig eben aufliegt, wird es auf einer Permanent-Magnet-Spannplatte vom Typ PM01110 der Firma *IHG* fixiert (3.6b (7)). Von oben wird anschließend der Filmziehrahmen zugestellt (3.6b (3)), der Lack in den Rahmen mit einer Spritze injiziert und durch Verfahren mit einer konstanten Geschwindigkeit auf das Probeblech aufgebracht. Am Ende des Probebleches ist in Verfahrrichtung ein Kunststoffblock (3.6b (6)) angebracht, der mit der Blechoberseite bündig abschließt. Damit wird ein Abkippen des Filmziehrahmens am Ende des Probebleches vermieden. Der Filmziehrahmen ist in einer Halterung (3.6b (4)) eingespannt, die über eine Parallelführung mit dem Linearachsentsch verbunden ist. Über Federn in der Parallelführung kann durch eine definierte Zustellung der Anlagedruck des Filmziehrahmens auf dem Probeblech eingestellt werden. Die Halterung für den Filmziehrahmen ist so konstruiert, dass entweder der Vierfach-Filmziehrahmen der Firma *Erichson* oder eigens gefertigte Rahmen eingesetzt werden können. Letztere wurden so ausgelegt, dass die Auflagefläche auf dem Blech minimiert wird. Die damit verbundene Erhöhung des Auflagedrucks kann wiederum durch die Zustellung und den Einsatz entsprechender Federn vermieden werden. Durch die verringerte, nahezu linienförmige Auflage des Filmziehrahmens auf dem Probeblech kann eine Spaltbildung im Gegensatz zur flächigen Auflage des zugekauften Filmziehrahmens vermieden werden. Damit zieht sich weniger Lack unter die Laufflächen des Filmziehrahmens, und steigert somit die Applikationsgenauigkeit. Abbildung 3.7b zeigt von *Schmidt* [92] durchgeführte Versuche. Bei der maschinellen Applikation mit einer durchschnittlich applizierten Lackmasse von 1,27 g beträgt die Standardabweichung lediglich 0,07 g. Das maschinelle Applizieren ist bezüglich der Standardabweichung um den Faktor 3,5 genauer als die manuelle Applikation und kommt daher bei den hier beschriebenen Versuchen zum Einsatz.

3.5. Versuchsablauf der Aufheizversuche

Vor Versuchsbeginn wird, unabhängig von der Konfiguration der Messzelle (Abbildung 3.1), die Trocknungsanlage in Betrieb genommen. Nacheinander werden Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit sowie die Wandtemperatur der Messzelle eingestellt und in einen stationären Betriebszustand gebracht. Dies kann, je nach gewählter Parameterkonfiguration, bis zu zwei Stunden in Anspruch nehmen. Anschließend wird ein Nullspektrum mit dem FTIR-Spektrometer aufgenommen, es sei denn, es sind nur Aufheizversuche in einer Messabfolge geplant. Die zugeschnittenen Probebleche werden mit Butylacetat gereinigt und nach ausreichender Abluftzeit in die Messzelle durch Öffnen und Schließen einer Klappe an der Messzellenseitenwand eingelegt. Für das Einlegen wird ein spezieller Blechheber verwendet. Nach dem Einlegen des Bleches und Schließen der Öffnungsklappe wird die Aufnahme der Messdaten mit einer Frequenz von 1 Hz gestartet. Die Dauer eines Aufheizversuches beträgt bei Standardversuchen 600 s.

3.6. Versuchsablauf der Trocknungsversuche

Die Inbetriebnahme der Anlage bei Trocknungsversuchen entspricht der Inbetriebnahme bei Aufheizversuchen nach Kapitel 3.5. Die mit Butylacetat gereinigten Probebleche werden gewogen und anschließend mit Lack beschichtet. Direkt nach der Applikation wird das Gewicht von Lack und Probeblech erfasst und das Blech in die Messkammer eingelegt. *Crößmann* [16] stoppt die Zeit zwischen Applikation und Messbeginn auf weniger als 30 s.

Nach Einlegen des Probebleches in die Messkammer und Schließen der Öffnungsklappe beginnt die eigentliche Messung des Trocknungsvorgangs. Nach der Trocknung wird das Probeblech aus der Messzelle entnommen. Das Gewicht des Probebleches wird nach einer kurzen Abkühlphase erneut gemessen. Je nach Versuch wird der Lack auf dem Probeblech noch in einem Konvektionsofen bei 140 °C eingebrannt oder eine weitere Lackschicht bei Zweischichtversuchen appliziert und getrocknet. Nach dem Einbrennen der Lackschichten erfolgt wiederum eine Messung des Gewichtes des Probebleches.

3.7. Chromatisch-konfokale Abstandsmessungen

Die Methode der chromatisch-konfokalen Abstandsmessung (CKA) wird verwendet, um die Oberflächenprofilierung bei der Trocknung zu verfolgen. Es wird der Einfluss einer strukturierten Oberfläche auf die sich ausbildende Filmoberfläche untersucht. Anhand der Versuche soll geprüft werden, ob die Annahme eines eindimensionalen Stofftransportes im Lackfilm auch in Kantennähe gültig ist. Zur Erfassung der Oberflächenprofilierung wird das *CHROcodile E* der Firma *Precitec* verwendet. Abbildung 3.8a zeigt die prinzipielle Funktionsweise nach *Kunkel und Schulze* [59].

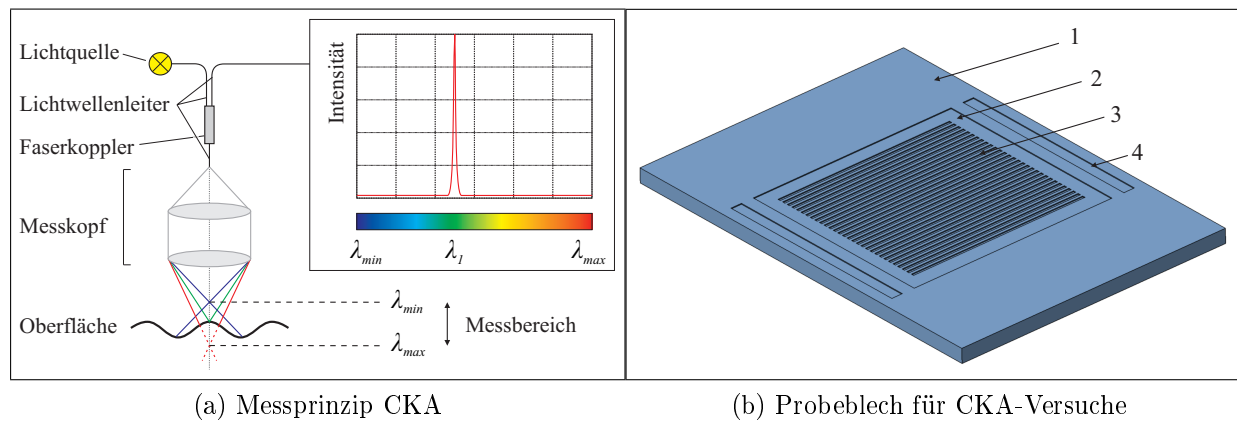


Abbildung 3.8.: Chromatisch-konfokale Abstandsmessung (CKA)

Weißes Licht wird durch einen Lichtleiter zu einem Messkopf mit einem Linsensystem geleitet. Die Linsen brechen das aus dem Messkopf ausfallende Licht so, dass der Fokus des blauen Lichtes (λ_{min}) näher am Messkopf liegt als der Fokus des roten Lichtes (λ_{max}). Liegt eine Oberfläche im Fokus einer Lichtwellenlänge, wird diese reflektiert, vom Messkopf wieder aufgenommen und anschließend detektiert. Aus dem Abstand zwischen den Fokussen von λ_{min} und λ_{max} ergibt sich der Messbereich des Messkopfes. Dieser beträgt bei den durchgeführten Versuchen 3 mm bei einer Auflösung von $\pm 5 \mu\text{m}$ in Richtung der optischen Achse. Die Messungen erfolgten mit 4000 Hz.

Pistner [72] entwirft für die Versuche eine spezielle Probengeometrie, wie in Abbildung 3.8b dargestellt. In 5 mm starke Aluminiumplatten mit den Abmaßen $l \cdot b = 140 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}$ (3.8b (1)) wird eine 0,2 mm tiefe Tasche (3.8b (2)) gefräst. In diese sind wiederum 30 Nuten mit einer Breite von 1 mm gefräst (3.8b (3)), von denen je sechs Nuten die Tiefen 15, 20, 25, 30 und 40 μm haben. Die Stege zwischen den Nuten haben ebenfalls eine Breite von 1 mm. Fräsnuten neben der Tasche (3.8b (4)) dienen als Lagereferenz für den Sensor. Mit einer ferromagnetischen Spannhilfe wird die Platte auf den Magnettisch gespannt

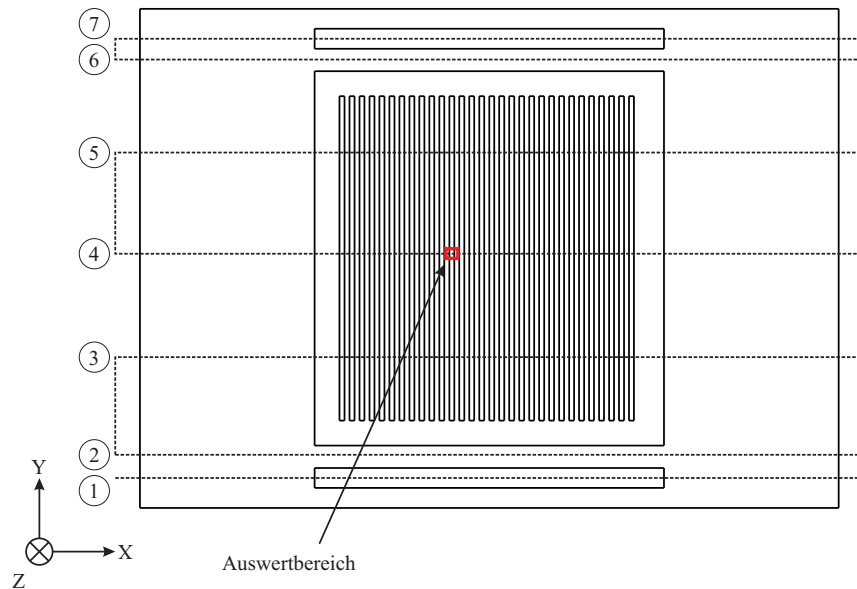


Abbildung 3.9.: Mäanderförmige Messbahn und Auswertbereich

und der Lack mit einem Filmziehrahmen mit einer Spalthöhe von $90\text{ }\mu\text{m}$ appliziert. Die anschließende Trocknung erfolgt bei Umgebungsbedingungen. Während der zweistündigen Trocknung wird die Distanz zwischen Messkopf und der Oberfläche des Lackfilms auf drei mäanderförmig angeordneten Bahnen erfasst (Abbildung 3.9.) Die Verfahrensgeschwindigkeit beträgt $12,5\text{ mm/s}$, was einer theoretischen örtlichen Auflösung in Fahrtrichtung von etwa $3\text{ }\mu\text{m}$ entspricht. Der Messfleck hat einen Durchmesser von $12\text{ }\mu\text{m}$. Nach der zweistündigen Trocknung wurden die Bleche weitere 22 Stunden bei Umgebungsbedingungen getrocknet und anschließend in einem Konvektionsofen bei $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ für 30 min eingebrannt. Nach der Applikation sowie nach jedem Trocknungsschritt wurde das Gewicht der Proben gemessen. Die Auswertung für den in Abbildung 3.9 markierten Bereich wird in Kapitel 5.3 vorgestellt und diskutiert.

4. Trocknungsmodellierung

Die Trocknungssimulation soll Aufschluss über den zeitlichen Verlauf des verdunstenden Massenstroms und der lokalen Zusammensetzung in der Lackschicht geben. Da die Eigenschaften des Lackfilms nicht nur von der Zusammensetzung, sondern auch von der Temperatur abhängen, muss dieser Einfluss ebenfalls berücksichtigt werden. Zur Trocknungsmodellierung müssen daher nachfolgende physikalische Phänomene abgebildet werden:

- Wärme- und Stofftransport in der Lackschicht und Wärmetransport im Substrat
- Schichtdickenabnahme aufgrund der Lösemittelverdunstung
- Gleichgewichtszustände an der Phasengrenze zwischen der freien Oberfläche des Lackfilms und dem Trocknungsgas
- Wärme- und Stoffübergang von der freien Oberfläche des Lackfilms zum umgebenden Trocknungsgas
- Wärme- und Stofftransport in der umgebenden Gasphase

Zur Abbildung der Phänomene in der Lackschicht wurde ein von *Schröder* [93] und *Geipel* [36] vorgeschlagenes eindimensionales Modell zugrundegelegt und so modifiziert, dass es in das CFD-Programm FLUENT integriert werden konnte. Auf diese Weise werden gegenüber diesen Arbeiten die Simulation der Trocknung von dreidimensionalen Objekten in realitätsnahen Trocknern unter Berücksichtigung der realen Objektumströmung möglich.

4.1. Modellierungsstrategie für den Lackfilm

Applizierte Lackfilme im Automotive-Bereich haben eine Nassschichtdicke von circa $60\ \mu\text{m}$ bis $80\ \mu\text{m}$. Die Abnahme der Schichtdicke beträgt in Abhängigkeit des Festkörperanteils 80 % bei Standard-Lacksystemen und 50 % bei sogenannten High-Solid-Systemen. Die zu erwartenden Trockenschichtdicken erstrecken sich daher über einem Bereich von $8\ \mu\text{m}$ bis $40\ \mu\text{m}$ (Tabelle 4.1).

Nassschichtdicke:	40 μm		80 μm	
Abnahme Schichtdicke:	80 %	50 %	80 %	50 %
Trockenschichtdicke:	8 μm	20 μm	16 μm	40 μm

Tabelle 4.1.: Nass- und Trockenschichtdicken

Die Lackschicht und deren transiente Schichtdickenreduktion kann auf zwei Arten modelliert werden. Zum einen ist durch die Verwendung eines CFD-Solvers (in dieser Arbeit: FLUENT) ein numerisches Gitter zur Berechnung des Wärme- und Stofftransports in der Gasphase ohnehin vorhanden. An lackierte Bauteile angrenzende Kontrollvolumina im Fluid könnten daher zur Modellierung der Lackschicht verwendet werden. Zur Abbildung

der Schichtdickenabnahme könnte dann beispielsweise ein Volume of Fluid-Ansatz (VOF) verwendet werden. Dabei wird ein skalarer Wert zur Beschreibung des Volumenanteils der unterschiedlichen Phasen in die Transportgleichung aufgenommen. Dieser Ansatz bedingt jedoch eine hohe Anzahl von Kontrollvolumina in der an das lackierte Bauteil grenzenden Strömungsgrenzschicht. Zwischen den Abmaßen einer Karosserie von mehreren Metern in einem Trockner mit einer Länge von bis zu 50 m und der ebenfalls aufzulösenden Lackschicht im trockenen Zustand von wenigen Mikrometern ist ein Dimensionsverhältnis der Ordnung $O \approx 10^8$ anzusetzen. Aufgrund des zu erwartenden hohen Rechenaufwandes und Speicherbedarfs wird im folgenden der VOF-Ansatz nicht weiter betrachtet.

Die zweite Variante stellt die Modellierung der Lackschicht in einem separaten, entdimensionierten Gitter dar, dessen absolute Höhe sich der Trocknung entsprechend verändert. Zur Transformation der Transportgleichungen und gegebenenfalls der Kontinuitätsgleichung wird das „Front-Fixing-Verfahren“ angewendet. Hierzu wird die räumliche Koordinate z durch die zeitlich abhängige Schichtdicke $X(t)$ dividiert. Für die entdimensionierte Koordinate η gilt:

$$\eta = \frac{z}{X(t)} \quad (4.1)$$

Das dimensionslose Koordinatensystem wird so gewählt, dass $\eta = 0$ immer an der Oberfläche des Substrates und $\eta = 1$ an der Phasengrenze zum Umgebungsmedium gilt. Abbildung 4.1 zeigt das entdimensionierte Koordinatensystem in der Lackschicht.

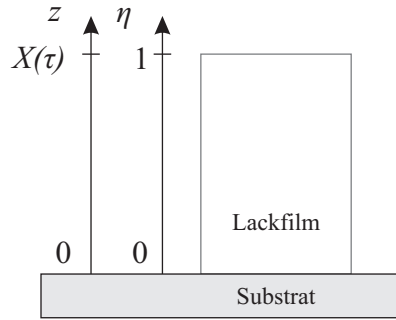


Abbildung 4.1.: Entdimensioniertes Koordinatensystem

Im Gegensatz zur räumlichen Koordinate z wird die Zeit t nicht entdimensioniert:

$$\tau = t \quad (4.2)$$

Mit einer Funktion Θ in Abhängigkeit des Ortes und der Zeit

$$\Theta = f_1(z, t) = f_2(\eta, \tau) \quad (4.3)$$

werden zur Transformation die nachfolgenden Gleichungen verwendet:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \eta} = \frac{\partial \Theta}{\partial z} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + \frac{\partial \Theta}{\partial t} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial \Theta}{\partial z} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \frac{\partial \Theta}{\partial t} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \quad (4.5)$$

Bei der Transformation werden zwei Transformationsgleichungen ϕ und ψ für die Koordinate und die Zeit eingesetzt. Diese sind

$$z = \phi(\eta, \tau) = X(\tau) \cdot \eta \quad (4.6)$$

$$t = \psi(\eta, \tau) = \tau \quad (4.7)$$

Das entdimensionierte Koordinatensystem muss zu jedem Zeitpunkt an jedem Ort in das dimensionsbehaftete Koordinatensystem überführbar sein und umgekehrt. Die Überführung erfolgt über die Formulierung von Randbedingungen, welche in den oben stehenden Transformationsgleichungen mit angegeben sind. Aus ihnen folgen

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = X(\tau) ; \quad \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \eta \frac{\partial X(\tau)}{\partial \tau} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = 0 ; \quad \frac{\partial \psi}{\partial \tau} = 1 \quad (4.9)$$

Eingesetzt in die Transformationsgleichungen (4.4) und (4.5) ergibt sich also

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \eta} = \frac{\partial \Theta}{\partial z} X(\tau) \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial \Theta}{\partial z} \cdot \eta \frac{\partial X(\tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (4.11)$$

Auflösen von Gleichung (4.10) nach $\frac{\partial \Theta}{\partial z}$ und anschließendes Einsetzen in die nach $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ aufgelöste Gleichung (4.11) liefern:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{1}{X(\tau)} \frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial t} &= \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} - \frac{\partial \Theta}{\partial z} \cdot \eta \frac{\partial X(\tau)}{\partial \tau} \\ &= \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} - \frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \frac{\eta}{X(\tau)} \frac{\partial X(\tau)}{\partial \tau} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Die Transformationsgleichungen werden im folgenden Kapitel 4.3.1 auf die Transportgleichungen angewendet.

4.2. Stoffwerte

Zur Berechnung des Wärme- und Stofftransportes in Lackfilm und Gasphase sowie der Wärmeleitung im Substrat sind temperaturabhängige und gegebenenfalls konzentrationsabhängige Korrelationen für die Stoffwerte notwendig. Für die im Lack und der Gasphase vorhandenen Stoffe benötigt man:

- Dichte,
- spezifische Wärmekapazität,
- Wärmeleitfähigkeit,
- kinematische Viskosität,
- Diffusionskoeffizienten in den jeweils anderen Komponenten

bekannt sein. Ferner müssen bei Lösemitteln, die ihren Aggregatzustand während der Trocknung ändern, weitere Stoffdaten bekannt sein. Diese sind:

- Verdampfungsenthalpie und

- Sättigungsdampfdruck.

Für das Substrat benötigt man folgende Stoffwerte:

- Dichte,
- spezifische Wärmekapazität,
- Wärmeleitfähigkeit,

Die Korrelationen sind in Abhängigkeit der Temperatur und gegebenenfalls der Konzentration aufgestellt. Sollten für Stoffwerte keine Korrelationen zur Verfügung, wurden tabellierte Werte durch Polynome angenähert. Die Korrelationen, deren Parameter sowie die Koeffizienten der Polynome sind im Anhang A angegeben. Im folgenden werden die verwendeten Gleichungen zur Berechnung der Eigenschaften des Gemisches angegeben.

4.2.1. Gasphase

Das Gasgemisch „Luft“ wird als eine einzelne Komponente angesehen. Weiterhin enthält die Luft Wasserdampf, und, bei der Berechnung von Trocknungsvorgängen, das Lösemittel Butylglykol.

Dichte

Die Dichte einer Mischung wird nach dem *FLUENT User's Guide* [4]¹ wie folgt berechnet:

$$\rho_{mix} = \frac{1}{\sum_i \frac{\xi_i}{\rho_i}} \quad (4.14)$$

Spezifische Wärmekapazität

Für die spezifische Wärmekapazität gilt nach [4]²:

$$c_{p\,mix} = \sum_i c_{p\,i} \xi_i \quad (4.15)$$

Wärmeleitung

Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt nach [4]³:

$$\lambda_{mix} = \sum_i \lambda_i \xi_i \quad (4.16)$$

Dynamische Viskosität

Die dynamische Viskosität wird nach [4]⁴ wie folgt berechnet:

$$\eta_{mix} = \sum_i \eta_i \xi_i \quad (4.17)$$

¹Fluent User's Guide, Gleichung 8.3-7, „volume-weighted-mixing-law“

²FLUENT User's Guide, Gleichung 8.7-6, „mixing-law“

³FLUENT User's Guide, Gleichung 8.5-8, „mass-weighted-mixing-law“

⁴FLUENT User's Guide, Gleichung 8.4-13, „mass-weighted-mixing-law“

Diffusionskoeffizienten

Die Trocknungsluft weist nur eine geringe Beladung von Wasser und Butylglykol auf ($X_i \leq 10 \text{ g/kg}_{\text{tr,LU}} \hat{=} 1 \%$). Der binäre Diffusionskoeffizient einer idealen Lösung (in der Praxis sind das maximal 5...10 % der Komponente I in der Komponente II) ist nach [105]⁵ weitgehend unabhängig von der Konzentration. Für die Diffusionskoeffizienten in der Gasphase wird daher der Ansatz von *Fuller, Schettler und Gidings* [33] zur Berechnung der binären Diffusionskoeffizienten angewendet:

$$D_{ij} = 10^{-2} \frac{T^{1,75} \left(\frac{\bar{M}_1 + \bar{M}_2}{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_2} \right)^{1/2}}{p \left((\sum v)_i^{1/3} + (\sum v)_j^{1/3} \right)^2} \cdot 1,013 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (4.18)$$

Der Druck ist in die Zahlenwertgleichung in Pascal einzusetzen. Die Diffusionsvolumina geben *Sherwood, Pigford und Wilke* [97] wie folgt an:

$$\begin{aligned} \text{Wasser} \quad \left(\sum v \right)_{WA} &= 12,7 \\ \text{Butylglykol} \quad \left(\sum v \right)_{BG} &= 137,68 \\ \text{Luft} \quad \left(\sum v \right)_{LU} &= 20,1 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Zur Verwendung in FLUENT wurde die Korrelation für die unterschiedlichen Komponenten berechnet und von einem Polynom 3. Ordnung in einem Gültigkeitsbereich von 5 °C bis 95 °C in Abhängigkeit der Temperatur beschrieben. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich der Druck $p = 1013 \text{ mbar}$ nur geringfügig ändert ($Ma < 0,1$; Kapitel 4.5.1). Für ein Gemisch schlagen *Reid und Sherwood* [75] nachfolgende Gleichung vor. Diese wird auch von FLUENT verwendet [4]⁶.

$$D_{i,mix} = \frac{1 - y_i}{\sum_{j,j \neq i} y_j / \mathcal{D}_{ij}} \quad (4.20)$$

4.2.2. Lackfilm

Der Lackfilm besteht aus dem ternären Gemisch Wasser, Butylglykol und Polyurethan. Es werden folgende Gleichungen zur Berechnung der Stoffeigenschaften des Gemisches angewendet:

Dichte

Bei flüssigen Gemischen, bei denen die Reinstoffe für den betrachteten Zustand ebenfalls flüssig sind, gilt die Regel von *Amagat* [105]⁷ für das spezifische molare Volumen einer Mischung \bar{v}_{mix} :

$$\bar{v}_{mix} = \sum_i x_i \bar{v}_i \quad (4.21)$$

⁵VDI Wärmeatlas 10. Auflage, Da35

⁶FLUENT User's Guide, Gleichung 8.9-2

⁷VDI Wärmeatlas, 10. Auflage, Da18

Somit kann die Dichte eines fluiden Gemisches wie folgt über die Molanteile und die Reinstoffwerte berechnet werden:

$$\rho_{mix} = \frac{\sum_i x_i \bar{M}_i}{\sum_i \frac{x_i \bar{M}_i}{\rho_i}} \quad (4.22)$$

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität wird entsprechend den Umformungen bei der Dichteberechnung über die Molanteile und die Reinstoffwerte berechnet [105]⁸. Aus der Mischungsregel $\bar{C}_p = \sum_i x_i \bar{C}_{p,i}$ leitet sich nachfolgende Gleichung ab:

$$c_{p,mix} = \frac{\sum_i x_i \bar{M}_i \bar{c}_{p,i}}{\sum_i x_i \bar{M}_i} \quad (4.23)$$

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit des Gemisches kann nach der Mischungsregel berechnet werden.

$$\lambda_{mix}^r = \sum_i x_i \lambda_i^r \quad (4.24)$$

Nach dem VDI-Wärmeatlas [105]⁹ wird empfohlen, den angegebenen Wert von $r = -2$ durch eigene Messungen anzupassen. *Geipel* [36] und *Schröder* [93] geben hier eigene Werte an. So ist nach Geipel $r = -3,44634$. Die errechnete Größe für die Mischung hat keinen Einfluss auf die transienten Rechenergebnisse, da auf das Lösen der Energiegleichung in der Lackschicht verzichtet wird. Dennoch wird die Größe berechnet, um eine Anbindung an ein Fehlermodell zu ermöglichen [26].

Dynamische Viskosität

Die Viskosität kann mit nachfolgender Gleichung nach dem VDI-Wärmeatlas [105]¹⁰ abgeschätzt werden. Allerdings kann nach [105] die errechnete Größe mit großen Fehlern behaftet sein. Dies ist jedoch akzeptabel, da die dynamische Viskosität wie die Wärmeleitfähigkeit lediglich als Auswertgröße dient und nicht in die transienten Berechnungen eingeht.

$$\ln(\eta_{mix}) = \sum_i x_i \ln(\eta_i) \quad (4.25)$$

Diffusionskoeffizienten

Zur Lösung der aufgestellten Transportgleichung (4.39) sind neben der Dichte auch Diffusionskoeffizienten notwendig. Für die Lösemittel Wasser (I) und Butylglykol (II) kann folgende Diffusionskoeffizientenmatrix aufgestellt werden:

$$D_{ij} = \begin{pmatrix} D_{II} & D_{I II} \\ D_{II I} & D_{II II} \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

⁸VDI Wärmeatlas, 10. Auflage, Da27

⁹VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage, Da34

¹⁰VDI Wärmeatlas, 10. Auflage, Da31

Die Diffusionskoeffizienten D_{ij} mit $i = j$ werden als Hauptdiffusionskoeffizienten, alle anderen als Kreuzdiffusionskoeffizienten bezeichnet. Der Koeffizient D_{II} beschreibt den diffusiven Massenstrom der Komponente I, hervorgerufen durch das eigene Konzentrationsgefälle. Gilt für den Nebendiagonalkoeffizient $D_{III} \neq 0$, so ruft ein Konzentrationsgradient der Komponente I auch einen diffusiven Massenstrom der Komponente II hervor. Selbiges gilt für den Koeffizienten D_{III} . Ist dieser ungleich Null, so verursacht ein Konzentrationsgradient der Komponente II einen diffusiven Massenstrom der Komponente I.

Der Betrag des Verhältnisses $|D_{ij \text{ mit } i \neq j} / D_{ij \text{ mit } i=j}|$ für nicht-dissoziierende Stoffe ist nach Cussler [17] kleiner als 10 %. Ferner sind Kreuzdiffusionskoeffizienten experimentell nur schwer zu ermitteln und werden daher häufig vernachlässigt.

Für binäre Systeme werden im VDI-Wärmeatlas [105] unterschiedliche Berechnungsmethoden vorgeschlagen, unter anderem die von *Wilke und Chang*. Für die Berechnung des Diffusionskoeffizienten bei höheren Konzentrationen der Komponente I in der Komponente II wird in [105] die Korrelation von *Vignes* vorgeschlagen. Darin werden binäre Diffusionskoeffizienten der einzelnen Komponenten in einer idealen Lösung mit der jeweiligen Aktivität konzentrationsabhängig verknüpft. Für mehrkomponentige Systeme werden in [105] keine Empfehlungen gegeben.

Sckuhr [96] ermittelt experimentell Polynome für die Hauptdiffusionskoeffizienten (Anhang A) für das ternäre System bestehend aus Wasser, Butylglykol und Polyurethan in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration. Diese Polynome werden in dieser Arbeit verwendet.

4.2.3. Substrat und Wände der Messzelle

Als Substrat wurde in den Experimenten KTL-beschichtetes Stahlblech mit einer Wandstärke von $s = 0,8$ mm verwendet. Die KTL-Schicht hat eine Schichtdicke von maximal $15 \mu\text{m}$ und wird daher vernachlässigt. Die Wände der Messzelle bestehen aus Aluminium. Stahlblech und Aluminium werden isotrop angesehen. Eine Ausnahme stellt der betrachtete Fall eines mit Türisolationsmaterial beklebten Stahlblechs da. Auf die genaue Modellierung wird in Kapitel 5.2 eingegangen. Der Fall eines anisotropen Substrates wird am Beispiel eines Faserverbundwerkstoffes in Kapitel 5.5.1 betrachtet.

4.3. Erhaltungsgleichungen im Lackfilm

Die Modellierung des Verhaltens aller Komponenten in einem realen Lacksystem ist aufgrund der Vielzahl der verwendeten Stoffe kaum durchführbar. Zum einen fehlen theoretische Ansätze zu Diffusion und Phasenübergang von n-komponentigen Systemen, zum anderen ist die Bestimmung der Stoffdaten, insbesondere der Interaktionsparameter und der Diffusionskoeffizienten, sehr aufwändig. Daher wird im Folgenden von einem ternären Modelllacksystem ($k = 3$) ausgegangen. Das Modelllacksystem besteht aus dem Lösemittel Wasser, dem organischen Lösemittel Butylglykol und dem Festkörper Polyurethan. Das System beschreibt die in der Praxis verwendeten wasserbasierten Lacksysteme in Bezug auf die Trocknungseigenschaften mit ausreichender Genauigkeit (Kapitel 5.2.4). Dies ist eine elementare Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der Trocknungsmodelle zur Vorhersage von Trocknungsprozessen in der industriellen Praxis.

4.3.1. Stofftransport

Bezüglich der Mischung der Reinstoffe Wasser, Butylglykol und Polyurethan im Modelllack wird von der Gültigkeit volumetrischer Additivität ausgegangen.

$$\sum_i \rho_i \hat{V}_i = 1 \quad (4.27)$$

Dabei ist \hat{V}_i das spezifische partielle Volumen der Komponente i . Durch die einsetzende Trocknung an der freien Oberfläche des Lackfilms verringert sich dort die Konzentration des Lösemittels. Dies ruft innerhalb der Lackschicht diffusive Massenströme hervor. Die Masse verringert sich durch das Verdunsten der Lösemittel so lange, bis sich ein Gleichgewichtszustand mit der angrenzenden Gasphase einstellt. Dieser Vorgang wird auch als hygroskopische Trocknung bezeichnet [57].

Neben der Massenänderung durch die Trocknung kann sich die Masse des Gesamtsystems sowie der Konzentrationsgradient durch nacheinander erfolgende Applikationen und wiederholte Trocknungen ändern. Dies kann im Trocknungsmodell ebenfalls berücksichtigt werden. Auf die Vorgehensweise zur Trocknung mehrerer Schichten wird in Kapitel 5.5.5 näher eingegangen.

Der Stofftransport in einer Lackschicht kann mit folgender Gleichung für den flächenbezogenen Massenstrom beschrieben werden und setzt sich aus einem diffusiven Anteil j_i und einem konvektiven Anteil $\dot{M}_{i,K}$ zusammen. Für ein beliebiges Bezugssystem gilt:

$$\dot{M}_i = u_i \rho_i = j_i + \dot{M}_{i,K} \quad (4.28)$$

Dabei kann für den konvektiven Anteil mit der Geschwindigkeit u und der Dichte ρ angegeben werden.

$$\dot{M}_{i,K} = \rho_i u \quad (4.29)$$

Somit ergibt sich für den Diffusionsanteil der i -ten Komponente

$$j_i = \rho_i(u_i - u) \quad (4.30)$$

Schröder [93] und *Geipel* [36] verwenden in ihren Arbeiten die volumengemittelte Geschwindigkeit $u_v = 0$, die aus der Randbedingung einer massedichten Substratwand für ein ortsfestes Koordinatensystem im eindimensionalen Fall gilt:

$$\dot{M}_{i,K} = \rho_i u_v \quad (4.31)$$

$$j_{v,i} = \rho_i(u_i - u_v) \quad (4.32)$$

Da für das Lacksystem nur massebezogene Diffusionskoeffizienten vorliegen, wird das massenbezogene Bezugssystem verwendet. Mit der massengemittelten Geschwindigkeit u_ρ gilt:

$$\dot{M}_{i,K} = \rho_i u_\rho \quad (4.33)$$

$$j_{\rho,i} = \rho_i(u_i - u_\rho) \quad (4.34)$$

Die diffusive Massenstromdichte nach dem 1. Fickschen Gesetz für polynäre Gemische lautet im eindimensionalen Fall:

$$j_{\rho,i} = - \sum_j^{k-1} D_{ij} \frac{\partial(\rho \xi_i)}{\partial z} \quad (4.35)$$

Dabei sind D_{ij} die Diffusionskoeffizienten der i -ten Komponente bezüglich des j -ten Konzentrationsgradienten und z die Koordinatenrichtung senkrecht zur Substratebene (Abbildung 4.3, Kapitel 4.5.3). Der Massenanteil der i -ten Komponente ξ_i ist wie folgt definiert:

$$\xi_i = \frac{M_i}{\sum_i M_i} \quad (4.36)$$

Vernachlässigt man Konzentrationsgradienten und Schichtunebenheiten parallel zur Substratebene, kann für die Lackschicht die Kontinuitätsgleichung in eindimensionaler Form aufgestellt werden:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \dot{M}_i}{\partial z} = \dot{M}_{Q,i} \quad (4.37)$$

Treten im Film keine Reaktionen auf, gilt für den Quellterm $\dot{M}_{Q,i} = 0$. Für den Stofftransport der Komponente i im Lackfilm gilt mit Gleichung (4.28):

$$\frac{\partial(\rho \xi_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\dot{M}_K \xi_i - D_i \frac{\partial(\rho \xi_i)}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.38)$$

Ersetzt man Θ durch $(\rho \xi_i)$ in Gleichung (4.12) und Gleichung (4.13) und setzt anschließend beide in Gleichung (4.38) ein, so ergibt sich:

$$\frac{\partial(\rho \xi_i)}{\partial \tau} - \frac{\partial(\rho \xi_i)}{\partial \eta} \frac{\eta}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} + \frac{1}{X} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{M}_K \xi_i - \frac{\rho D_i}{X} \frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} - \frac{\xi_i D_i}{X} \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (4.39)$$

Der Term $\frac{1}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau}$ im 2. Summanden kann direkt in das Differential gezogen werden. Nach der Produktregel gilt dann für den 2. Summanden:

$$\eta \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\rho \xi_i \frac{1}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\eta}{X} \rho \xi_i \frac{\partial X}{\partial \tau} \right) - \rho \xi_i \frac{1}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} \quad (4.40)$$

Damit folgt für Gleichung (4.39):

$$\frac{\partial(\rho \xi_i)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[-\frac{\eta}{X} \rho \xi_i \frac{\partial X}{\partial \tau} + \frac{1}{X} \left(\dot{M}_K \xi_i - \frac{\rho D_i}{X} \frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} - \frac{\xi_i D_i}{X} \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\rho \xi_i}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} = 0 \quad (4.41)$$

In Gleichung (4.39) muss der Massenstrom bestimmt werden. Dazu wird die Kontinuitätsgleichung verwendet:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \dot{M}_K}{\partial z} = 0 \quad (4.42)$$

Nach der Entdimensionierung folgt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} - \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \frac{\eta}{X} \left(\frac{\partial X}{\partial \tau} \right) + \frac{1}{X} \frac{\partial \dot{M}_K}{\partial \eta} = 0 \quad (4.43)$$

Unter Verwendung der Produktregel

$$\eta \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\rho}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta \frac{\rho}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} \right) - \frac{\rho}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} \quad (4.44)$$

kann Gleichung (4.43) wie folgt aufgestellt werden:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta \frac{\rho}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} - \frac{1}{X} \dot{M}_K \right) + \frac{\rho}{X} \frac{\partial X}{\partial \tau} = 0 \quad (4.45)$$

Die Lösung von Gleichung (4.45) liefert den Massenstrom \dot{M}_K , der zur Lösung von Gleichung (4.39) benötigt wird.

4.3.2. Wärmetransport

Der dem Lackfilm entzogene Wärmestrom errechnet sich aus der Summe der verdampfenden Teilmassenströme multipliziert mit der jeweiligen Verdampfungsenthalpie:

$$\dot{Q} = \sum_i \dot{M}_i h_{v,i} \quad (4.46)$$

Die Temperatur des Lackfilms wird nach *Saure et al.* [84] über die Höhe isotherm angenommen und hat die Temperatur der darunterliegenden Wandoberfläche (Abbildung 4.3, Kapitel 4.5.3).

4.3.3. Randbedingungen

Zur Charakterisierung des Simulationsgebietes werden Randbedingungen benötigt. Grundsätzlich können an beiden Rändern des Simulationsgebietes im Lackfilm Massenanteile (Dirichlet'sche Randbedingung) oder Massenströme (Neumannsche Randbedingung) vorgegeben werden. Das Substrat kann als massedicht angenommen werden. Es gilt daher im dimensionsbehafteten Koordinatensystem:

$$z = 0 : \quad \frac{\partial \xi_i}{\partial z} = 0 \quad (4.47)$$

Somit ist im entdimensionierten Koordinatensystem:

$$\eta = 0 : \quad \frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} = 0 \quad (4.48)$$

An der freien Oberfläche des Lackfilms wird ein Lösemittelmassenstrom an die umgebende Gasphase abgegeben. Im raumfesten Koordinatensystem ergibt sich für die Kontinuitätsgleichung an der Phasengrenze nach Gleichung (4.28):

$$z = X(t) : \quad \dot{M}_i = -\rho D_i \frac{\partial \xi_i}{\partial z} + \xi_i \dot{M}_K \quad (4.49)$$

Nach dem Gradienten der Gewichtsanteile aufgelöst ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial z} = \frac{\dot{M}_K}{\rho D_i} \left(\xi_i - \frac{\dot{M}_i}{\dot{M}_K} \right) \quad (4.50)$$

Diese Gleichung kann nun in das entdimensionierte Koordinatensystem (η, τ) transformiert werden und man erhält:

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} = \frac{\dot{M}_K X(\tau)}{\rho D_i} \left(\xi_i - \frac{\dot{M}_i}{\dot{M}_K} \right) \quad (4.51)$$

Der Massenstrom wird explizit vorgegeben und errechnet sich wie in Kapitel 4.4 dargestellt.

4.4. Gleichgewichtszustände an der Phasengrenze

Bei der Berechnung des Phasenübergangs wird von einem lokalen thermischen, mechanischen und stofflichen Gleichgewicht an der Phasengrenze zwischen Lackfilm und der umgebenden Gasphase ausgegangen. Thermisches Gleichgewicht liegt dann vor, wenn beide Phasen an der Phasengrenze die gleichen Temperaturen aufweisen. Es gilt:

$$T^{G,ph} = T^{F,ph} \quad (4.52)$$

Bei mechanischem Gleichgewicht gilt an der Phasengrenze:

$$p^{G,ph} = p^{F,ph} \quad (4.53)$$

Das stoffliche Gleichgewicht wird durch die Gleichheit der chemischen Potentiale beziehungsweise der Fugazitäten der Komponenten beider Phasen beschrieben. Im flüssigen Aggregatzustand spricht man vom chemischen Potential μ_i einer Komponente i , im gasförmigen Aggregatzustand von der Fugazität f_i . Anschaulich darf die Fugazität im Fall der Lacktrocknung als eine „escaping tendency“ einer Komponente aus dem Lackfilm nach *Lewis* [60] interpretiert werden. *Hampe* [42] gibt nachfolgende Beziehung für das Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewicht einer Komponente i an:

$$y_i p^G = \gamma_i(T, p_{s,i}^F, x_i) \cdot x_i \cdot p_{s,i}^F \frac{\varphi_i(T, p_{s,i})}{\varphi_i(T, p, y_i)} \cdot \exp \int_{p_{s,i}}^p \frac{\hat{v}_i(T, p, x_i)}{RT} dp \quad (4.54)$$

γ_i ist dabei der Aktivitätskoeffizient. Der Exponentialterm in Gleichung (4.54) wird als Poynting-Korrektur bezeichnet und beschreibt die Verdichtung der kondensierten Phase. Bei hinreichend niedrigen Drücken bzw. ausreichender Entfernung vom kritischen Punkt kann die Korrektur nach *Stephan et al.* [103] gleich 1 gesetzt werden. Auch das Verhältnis der Fugazitätskoeffizienten weicht bei geringen Drücken kaum voneinander ab, der Bruch nimmt ebenfalls den Wert 1 an. Gleichung (4.54) vereinfacht sich damit zu:

$$y_i p^G = \gamma_i x_i p_{s,i}^F \quad (4.55)$$

Das Produkt $\gamma_i x_i$ nennt man auch die Aktivität a_i einer Komponente i [52]. Mit dem Partialdruck p_i^G kann schließlich folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$p_i^G = y_i p^G = a_i p_{s,i}^F \quad (4.56)$$

Zur Bestimmung der Aktivität des Lösemittels in Polymerlösungen wird die Flory-Huggins-Theorie angewendet. *Geipel* [36] wies nach, dass diese für wässrige Systeme einen geeigneten Ansatz darstellt. Nach der Flory-Huggins-Theorie gilt für binäre Systeme

$$\ln a_L = \ln \Phi_L + \left(1 - \frac{\bar{V}_L}{\bar{V}_P}\right) \Phi_P + \chi \Phi_P^2 \quad (4.57)$$

Dabei sind \bar{V}_L und \bar{V}_P die Molvolumina von Lösemittel und Polymer, sowie Φ der Volumenanteil von Lösemittel beziehungsweise Polymer. Der Interaktionsparameter χ wird aus Experimenten bestimmt und kann von Temperatur und der Zusammensetzung des Gemisches an der Lackoberfläche abhängen. Da bei den vorgestellten Lacksystemen kein binäres, sondern ein ternäres Gemisch vorliegt, muss die Flory-Huggins-Theorie entsprechend erweitert werden. *Favre* [32] schlägt folgende Gleichungen für ternäre Gemische vor:

$$\begin{aligned} \ln a_{L1} = & \ln \Phi_{L1} + (1 - \Phi_{L1}) - \left(\frac{\bar{V}_{L1}}{\bar{V}_{L2}}\right) \Phi_{L2} - \left(\frac{\bar{V}_{L1}}{\bar{V}_P}\right) \Phi_P + \\ & (\chi_{L1L2} \Phi_{L2} + \chi_{L1P} \Phi_P)(\Phi_{L2} + \Phi_P) - \chi_{L2P} \left(\frac{\bar{V}_{L1}}{\bar{V}_{L2}}\right) \Phi_{L2} \Phi_P \end{aligned} \quad (4.58)$$

$$\begin{aligned} \ln a_{L2} = & \ln \Phi_{L2} + (1 - \Phi_{L2}) - \left(\frac{\bar{V}_{L2}}{\bar{V}_{L1}}\right) \Phi_{L1} - \left(\frac{\bar{V}_{L2}}{\bar{V}_P}\right) \Phi_P + \\ & (\chi_{L1L2} \Phi_{L1} \frac{\bar{V}_{L2}}{\bar{V}_P} + \chi_{L2P} \Phi_P)(\Phi_{L1} + \Phi_P) - \chi_{L1P} \left(\frac{\bar{V}_{L2}}{\bar{V}_{L1}}\right) \Phi_{L1} \Phi_P \end{aligned} \quad (4.59)$$

Die in den Gleichungen (4.58) und (4.59) enthaltenen Interaktionsparameter χ_{L1L2} , χ_{L1P} und χ_{L2P} können der Literatur entnommen oder an entsprechende experimentelle Ergebnisse angepasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sie aus der Vorängerarbeit von Geipel [36] annähernd übernommen.

4.5. Erhaltungsgleichungen in der Gasphase

Die Berechnung der Strömung in der Gasphase erfolgt durch den CFD-Solver FLUENT. In FLUENT sind zwei unterschiedliche Solver implementiert: der Pressure-based-solver und der Density-based-solver. Da der Density-based-solver verschiedene Funktionen, wie beispielsweise das „Shell-Conduction-Model“ (Kapitel 4.5.3) nicht unterstützt, muss bei den Trocknungssimulationen der Pressure-based-solver verwendet werden.

4.5.1. Wärme- und Stofftransport

Im Pressure-Based-Solver (PBS) können Massen- und Impulserhaltung simultan (coupled, PBCS) oder sequentiell (segregated, PBSS) berechnet werden. Die sequentielle Lösung benötigt weniger Arbeitsspeicher als die simultane Lösung [4]. Dies ist insbesondere für numerische Gitter mit vielen Kontrollvolumina günstig, daher wird der sequentielle SIMPLE-Algorithmus auch zur Lösung der hier vorgestellten Simulationaufgaben verwendet.

Es werden folgende Gleichungen aufgestellt und nacheinander abfolgend numerisch gelöst:

- Impulserhaltung
- Massenerhaltung
- Energieerhaltung
- Skalare Transportgleichungen für einzelne Komponenten
- Turbulenzmodellbedingte Transportgleichungen
- Strahlungstransport

Die Erhaltungsgleichungen in der Gasphase werden in einem Finite-Volumen-Gitter formuliert. Zur Aufstellung der Erhaltungsgleichungen sei auf Standardwerke von Prantl [70] und Spurk [100] verwiesen. Die Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen in FLUENT wird im *FLUENT User's Guide* [4] und im *FLUENT Theory Guide* [3] beschrieben. Die maximal auftretenden Geschwindigkeiten in den Simulationen in dieser Arbeit sind deutlich geringer als 15 m/s. Damit gilt für die Mach-Zahl [63] $Ma < 0,1$. Die Strömung darf damit als inkompressibel angesehen werden.

Die Strömung wird mit dem k - ϵ -Turbulenzmodell simuliert. Dabei sind k die turbulente kinetische Energie und ϵ die Dissipationsrate. Die Einstellungen des CFD-Solvers FLUENT sind in Anhang B aufgelistet. Auf die Anwendbarkeit anderer Turbulenzmodelle wird in Kapitel 5.4.4 genauer eingegangen.

4.5.2. Strahlung

Bei der simulativen Nachstellung der Experimente sowie bei einem späteren Einsatz des Trocknungsmodells in der industriellen Praxis kann die im Trockner auftretende Strahlung

nicht vernachlässigt werden. In Kapitel 5.5.2 wird der Einfluss der Strahlung anhand eines Aufheizversuches diskutiert.

In FLUENT sind verschiedene Strahlungsmodelle implementiert. Tabelle 4.2 führt die Modelle samt ihrer wichtigsten Charakteristika und Eignung für die Simulation von 3-dimensionalen Oberflächen in Trocknern im industriellen Maßstab auf. Alle Modelle bauen auf unterschiedlichen Lösungsverfahren der Strahlungstransportgleichung (Radiative Transfer Equation, RTE) auf:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2\frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \omega(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (4.60)$$

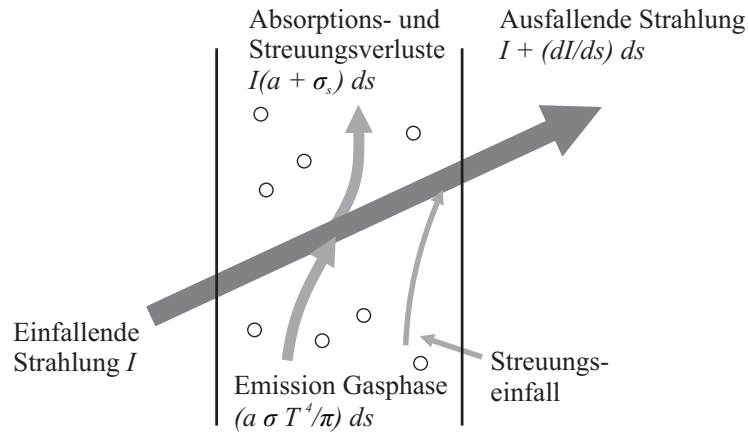


Abbildung 4.2.: Strahlungsmodell nach [4]

Abbildung 4.2 verdeutlicht bildlich die Bedeutung der einzelnen Summanden von Gleichung (4.60). Der erste Summand beschreibt die Änderung der Intensität in Strahlungsrichtung. Diese wird durch Absorption und Streuung vermindert (2. Summand) und durch Strahlung aus der Umgebung vergrößert (3. Summand). Der 4. Summand in Gleichung (4.60) beschreibt den Energieeintrag durch Emission aus der Gasphase.

Ausgehend von Tabelle 4.2 kommt nur das DO-Modell zur Modellierung der Strahlung in Trocknungsanlagen in Frage. Es bietet hohe Flexibilitäten in der Anwendung auch bei komplizierten numerischen Gittern und erlaubt auch die Beschreibung von nicht-grauen Strahlern. Diese Eigenschaft kann bei einer späteren Simulation von Infrarot-Konvektionstrocknern vorteilhaft sein. Bei allen hier vorgestellten Simulationen wurde die Annahme getroffen, dass von grauen Strahlern ausgegangen werden darf [57]. Die Strahlungsgleichung kann in FLUENT simultan oder sequentiell zur Energiegleichung berechnet werden. Die Gasphase ist kein optisch dichtes Medium, das heißt die Extinktion, also die Abschwächung der Strahlung durch Streuung und selektive Absorption, ist gering. Daher wurde auf eine Kopplung mit der Energiegleichung verzichtet [4]. Der Einfluss der Strahlungsabsorption von Wasserdampf wird in der Messzelle vernachlässigt. Zur Abbildung der Absorption steht in FLUENT zwar das „Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model“ (WSGGM) zur Verfügung, jedoch ist eine Gültigkeit erst ab Temperaturen $T > 600$ K gegeben, und es wird daher nicht verwendet.

Modell	Eigenschaften	Eignung
DTRM	Zusammenfassung von Strahlen in einem bestimmten Winkelbereich zu einem einzelnen Strahl, Berechnung der Sichtfaktoren zwischen Flächen <i>Nachteile:</i> keine Parallelisierung und Sliding Meshes möglich	nein
P-1	Die RTE wird als Diffusionsgleichung gelöst <i>Nachteile:</i> Genauigkeitsverlust bei komplexen Geometrien und niedriger optischer Dichte	bedingt
Rosseland	Geringerer Speicherbedarf und schnellere Berechnung durch eine Transportgleichung weniger im Vergleich zum P1 Modell <i>Nachteile:</i> nur für optisch dicke Medien (>3) geeignet und nicht im „Pressure-based-solver“ verfügbar	nein
S2S	Berechnung von Sichtfaktoren, schnellere Berechnung im Vergleich zum DO-Modell und DTRM <i>Nachteile:</i> keine Hanging Nodes und Mesh Adaption möglich	nein
DO	Lösung der RTE für eine endliche Anzahl an Winkeln, moderate CPU- und Speichernutzung, Modell ist für alle optischen Dicken anwendbar	ja

Tabelle 4.2.: Strahlungsmodelle in FLUENT

4.5.3. Randbedingungen

An den Rändern der Gasphase werden unterschiedliche Randbedingungen angegeben. Für die Trocknungssimulation ist dabei die Ankopplung des Lackfilms an die Gasphase von besonderer Bedeutung.

Beschichtetes Substrat

Mit Gleichung (4.56) kann die Konzentration an der Oberseite des Lackfilms der Gasphase als Randbedingung vorgegeben werden. Aufgrund des Massestroms an der Lackoberfläche in die Gasphase und dem damit verbundenen Massetransport im Lackfilm ändert sich die Konzentration der Komponenten an der Oberfläche transient. Anders als bei *Geipel* [36] und *Schröder* [93] kann jedoch der Massenstrom in einem räumlich und zeitlich veränderlichen Strömungsfeld berechnet werden. Abbildung 4.3 zeigt schematisch die Anbindung des Modells an die Gasphase.

Gleichung (4.56) wird nach y_i aufgelöst. Über den Zusammenhang

$$\xi_i^{G,ph} = \frac{y_i^{G,ph} \bar{M}_i}{y_i^{G,ph} \bar{M}_i + y_j^{G,ph} \bar{M}_j + (1 - y_i^{G,ph} - y_j^{G,ph}) \bar{M}_{LU}} \quad \text{mit } i, j \hat{=} WA, BG \quad (4.61)$$

kann der Massenanteil der Komponente i und j an der Oberfläche des Lackfilms zur Gasphase - in diesem Fall Luft - als Randbedingung vorgegeben werden. Nach einem Zeitschritt wird der aufgrund des Konzentrationsprofils hervorgerufene Massenstrom vom Lackfilm an die Gasphase wiederum explizit zur Berechnung des Wärmestroms nach Gleichung (4.46)

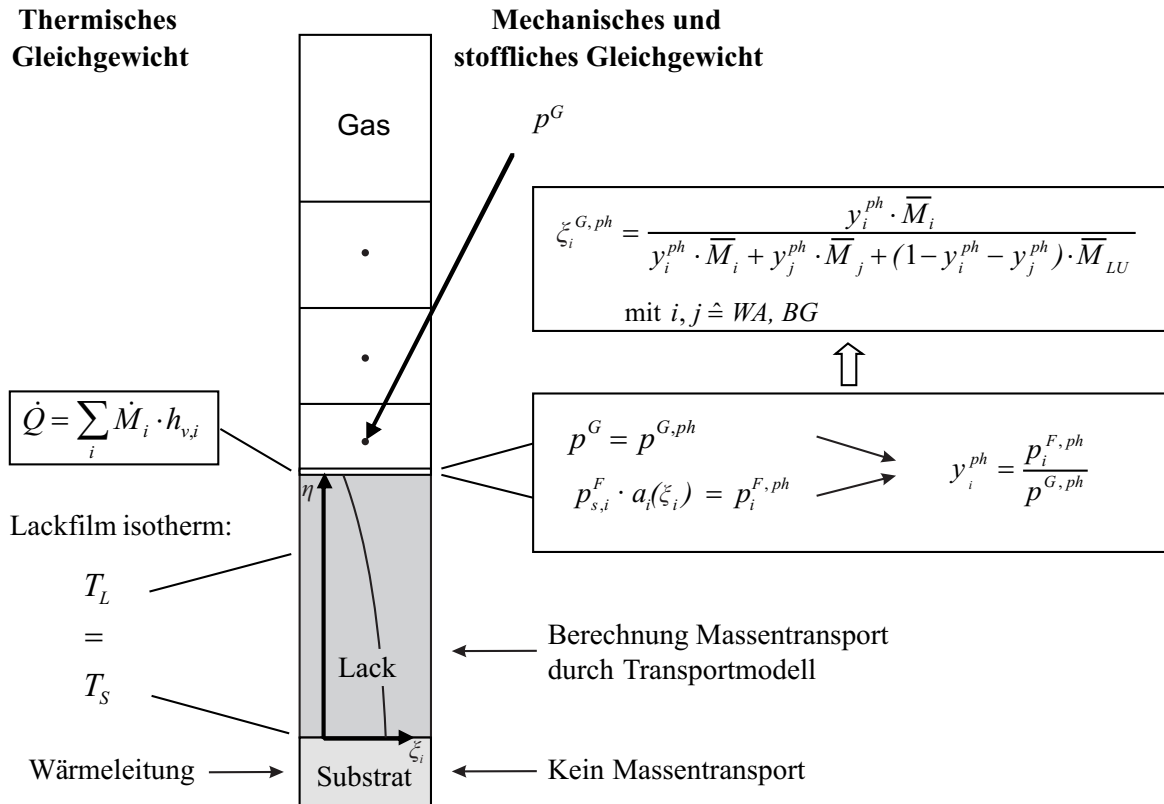


Abbildung 4.3.: Anbindung des Trocknungsmodells an die Gasphase

vorgegeben. Dieses Verfahren ist bei ausreichend kleiner Zeitschrittweite gültig und wird in Kapitel 5.4.2 weitergehend untersucht.

Unbeschichtetes Substrat und Wände

An den Wänden wird die Wandoberflächentemperatur vorgegeben. Diese entspricht aufgrund der geregelten Wandbeheizung der Temperatur des einströmenden Gases. Die Vorgabe eines Emissionskoeffizienten ϵ ermöglicht die Berechnung des Strahlungsanteils der Wand. Die verwendeten Emissionskoeffizienten von Stahl und Aluminium sind im Anhang A angegeben.

Einlass

Am Strömungseinlass wird die gemittelte Strömungsgeschwindigkeit mit den aus den jeweiligen Versuchen ermittelten Temperaturen und absoluten Luftfeuchtigkeiten vorgegeben. Der hydraulische Durchmesser beträgt im Fall der Parallelströmung und Prallanströmung mit Wabenfilter $d_h = 101$ mm. Die turbulente Intensität wird auf 5,0 % nach [4] angesetzt.

Auslass

Am Auslass wird der statische Druck vorgegeben. Im Falle eines Rückflusses entspricht die Rückflusstemperatur der Temperatur am Einlass. Selbiges gilt für die Luftfeuchtigkeit. Ein Rückfluss tritt jedoch bei den Simulationen eines Probebleches in einer Parallelströmung sowie bei der Prallströmung mit dem Wabenfilter nicht auf.

4.6. Räumliche Diskretisierung

Die in Kapitel 4.3.1 aufgestellte Transportgleichung (4.39) sowie die Kontinuitätsgleichung (4.45) können nur numerisch gelöst werden. Dazu müssen diese diskretisiert werden. Hierfür wird die Finite-Volumen-Methode angewendet (Kapitel 4.6.1). Auf die Diskretisierung der Gasphase und des Substrates wird in Kapitel 4.6.2 eingegangen.

4.6.1. Diskretisierung des Lackfilms

Nachfolgende Abbildung 4.4 zeigt die Nomenklatur der Kontrollvolumen für die Finite-Volumen-Methode. Es wird die Kompassnotation entsprechend den Himmelsrichtungen angewendet. Da das Problemgebiet eindimensional ist, werden nur die Himmelsrichtungen „East“ (e , E) und „West“ (w , W) ausgehend vom Knotenpunkt P verwendet. Die Großbuchstaben (P , E , W) bezeichnen die Speicherstellen der Kontrollvolumina, die Kleinbuchstaben (e , w) kennzeichnen die Berandung des Kontrollvolumens.

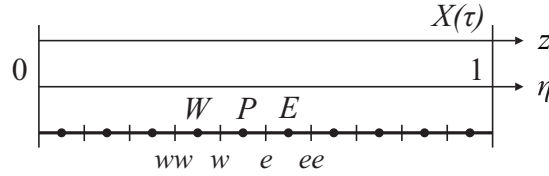


Abbildung 4.4.: Kontrollvolumen der Finite-Volumen-Methode

Die Transportgleichung (4.39) und die Kontinuitätsgleichung (4.45) werden mit der Schichtdicke X und über das Kontrollvolumen integriert und anschließend der Gaußsche Integralsatz angewendet. Beim Gaußschen Integralsatz gilt für die Ableitung einer Funktion $\int_w^e f dV = f(e) - f(w)$. Somit folgt für die Transportgleichung (4.39) der Komponente i :

$$\begin{aligned} & \dot{M}_{K,e} \xi_{i,e} - \dot{M}_{K,w} \xi_{i,w} - \rho_e \xi_{i,e} \eta_e \left(\frac{\partial X}{\partial \tau} \right) + \rho_w \xi_{i,w} \eta_w \left(\frac{\partial X}{\partial \tau} \right) \\ & - \frac{1}{X} \rho_e D_{i,e} \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} \right)_e + \frac{1}{X} \rho_w D_{i,w} \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} \right)_w - \frac{1}{X} \xi_e D_{i,e} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \eta} \right)_e + \frac{1}{X} \xi_w D_{i,w} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \eta} \right)_w \\ & + \left(\xi_{i,P} \left[\rho_P \left(\frac{\partial X}{\partial \tau} \right) + X \left(\frac{\partial \rho}{\partial \tau} \right)_P \right] (\eta_e - \eta_w) \right) + X \rho_P \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \tau} \right)_P (\eta_e - \eta_w) = 0 \end{aligned} \quad (4.62)$$

Die Kontrollvolumina sollen über die Höhe des Lackfilms nicht-äquidistant vorgegeben werden können, um in Bereichen großer Konzentrationsgradienten eine hohe Auflösung zu ermöglichen. Daher werden nachfolgende Gleichungen für die Berechnung der Massenströme an den Zellgrenzen (η_e, η_w) und an den Rändern des Simulationsgebietes verwendet.

Stofftransportgleichung

Die Massenanteile der Komponente i in der Transportgleichung (4.62) berechnen sich innerhalb des Simulationsgebietes mit einer linearen Interpolation wie folgt:

$$\xi_{i,e} = \xi_{i,E} \frac{(\eta_e - \eta_w)}{(\eta_{ee} - \eta_w)} + \xi_{i,P} \frac{(\eta_{ee} - \eta_e)}{(\eta_{ee} - \eta_w)} \quad (4.63)$$

$$\xi_{i,w} = \xi_{i,W} \frac{(\eta_e - \eta_w)}{(\eta_e - \eta_{ww})} + \xi_{i,P} \frac{(\eta_w - \eta_{ww})}{(\eta_e - \eta_{ww})} \quad (4.64)$$

Am Rand werden die Konzentrationen $\xi_{i,e}$ und $\xi_{i,w}$ nach *Dirichlet* direkt vorgegeben, oder nach *Neumann* mit Gleichung 4.51 berechnet werden. Es gilt am rechten Rand:

$$\xi_{i,e} = \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \left[\frac{\dot{M}X}{\rho D_i} \left(\xi_i - \frac{\dot{M}_i}{\dot{M}} \right) \right]_e + \xi_{i,P} \quad (4.65)$$

Durch Umformen und Auflösen nach $\xi_{i,e}$ erhält man:

$$\xi_{i,e} = \xi_{i,P} \left(\frac{1}{1 - \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_e X}{\rho_e D_{i,e}}} \right) - \left(\frac{\frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_{i,e} X}{\rho_e D_{i,e}}}{1 - \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_e X}{\rho_e D_{i,e}}} \right) \quad (4.66)$$

Analog gilt für $\xi_{i,w}$:

$$\xi_{i,w} = \xi_{i,P} \left(\frac{1}{1 - \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_w X}{\rho_w D_{i,w}}} \right) - \left(\frac{\frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_{i,w} X}{\rho_w D_{i,w}}}{1 - \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_w X}{\rho_w D_{i,w}}} \right) \quad (4.67)$$

Für die örtlichen Ableitungen der Konzentrationen in Gleichung (4.62) innerhalb des Simulationsgebietes gilt nach der Zentrale-Differenzenmethode:

$$\left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} \right)_e = \xi_{i,E} \frac{2}{\eta_{ee} - \eta_w} - \xi_{i,P} \frac{2}{\eta_{ee} - \eta_w} \quad (4.68)$$

$$\left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} \right)_w = \xi_{i,P} \frac{2}{\eta_e - \eta_{ww}} - \xi_{i,W} \frac{2}{\eta_e - \eta_{ww}} \quad (4.69)$$

Am Rand können bei Verwendung der Dirichletschen Randbedingung unter Vorgabe von $\xi_{i,e}$ und $\xi_{i,w}$ die Gradienten wie folgt berechnet werden:

$$\left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} \right)_e = \frac{2}{\eta_e - \eta_w} \xi_{i,e} - \frac{2}{\eta_e - \eta_w} \xi_{i,P} \quad (4.70)$$

$$\left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} \right)_w = \frac{2}{\eta_e - \eta_w} \xi_{i,P} - \frac{2}{\eta_e - \eta_w} \xi_{i,w} \quad (4.71)$$

Für die Dichte ρ gelten die gleichen Randbedingungen wie für die Konzentration ξ_i . In Gleichung (4.68)-(4.71) wird dabei ξ_i durch ρ ersetzt.

Bei Neumannschen Randbedingungen werden die Konzentrationen am Rand in Gleichung (4.70) und (4.71) durch Gleichung (4.66) bzw. (4.67) ersetzt. Man erhält mittels der Vorwärts- bzw. Rückwärts-Differenzen:

$$\left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} \right)_e = \frac{2\xi_{i,P}}{\eta_e - \eta_w} \left[\frac{\frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_e X}{\rho_e D_{i,e}}}{1 - \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_e X}{\rho_e D_{i,e}}} \right] - \frac{2}{\eta_e - \eta_w} \left[\frac{\frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_{i,e} X}{\rho_e D_{i,e}}}{1 - \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_e X}{\rho_e D_{i,e}}} \right] \quad (4.72)$$

$$\left(\frac{\partial \xi_i}{\partial \eta}\right)_w = \frac{-2\xi_{i,P}}{\eta_e - \eta_w} \left[\frac{\frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_w X}{\rho_w D_{i,w}}}{1 - \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_w X}{\rho_w D_{i,w}}} \right] + \frac{2}{\eta_e - \eta_w} \left[\frac{\frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_{i,w} X}{\rho_w D_{i,w}}}{1 - \frac{\eta_e - \eta_w}{2} \frac{\dot{M}_w X}{\rho_w D_{i,w}}} \right] \quad (4.73)$$

Die Dichte berechnet sich wie in Gleichung (4.63) und (4.64) für den Massenanteil dargelegt:

$$\rho_e = \rho_E \frac{(\eta_e - \eta_w)}{(\eta_{ee} - \eta_w)} + \rho_P \frac{(\eta_{ee} - \eta_e)}{(\eta_{ee} - \eta_w)} \quad (4.74)$$

$$\rho_w = \rho_W \frac{(\eta_e - \eta_w)}{(\eta_e - \eta_{ww})} + \rho_P \frac{(\eta_w - \eta_{ww})}{(\eta_e - \eta_{ww})} \quad (4.75)$$

Genauso gilt für den Diffusionskoeffizienten:

$$D_{i,e} = D_{i,E} \frac{(\eta_e - \eta_w)}{(\eta_{ee} - \eta_w)} + D_{i,P} \frac{(\eta_{ee} - \eta_e)}{(\eta_{ee} - \eta_w)} \quad (4.76)$$

$$D_{i,w} = D_{i,W} \frac{(\eta_e - \eta_w)}{(\eta_e - \eta_{ww})} + D_{i,P} \frac{(\eta_w - \eta_{ww})}{(\eta_e - \eta_{ww})} \quad (4.77)$$

Am Rand werden für die Dichte ρ und die Diffusionskoeffizienten D_i die Werte aus den Zellmittelpunkten der Randzellen übernommen. Die aufgestellten Gleichungen können nun in die Transportgleichung (4.62) eingesetzt und in Summanden in Abhängigkeit von $\xi_{i,E}$, $\xi_{i,P}$, $\xi_{i,E}$ und $(\partial \xi_i / \partial \tau)_P = \dot{\xi}_{i,P}$ zusammengefasst werden.

Kontinuitätsgleichung

Für die Berechnung der konvektiven Massenströme wird die Kontinuitätsgleichung (4.45) angewendet, über ein Kontrollvolumen integriert nimmt nach Anwendung des Gauß'schen Integralsatzes folgende Form an:

$$\dot{M}_{K,e} - \dot{M}_{K,w} = \left(\frac{\partial X}{\partial \tau}\right) [\eta_e(\rho_e - \rho_P) + \eta_w(\rho_P - \rho_w)] - X \left(\frac{\partial \rho}{\partial \tau}\right)_P (\eta_e - \eta_w) \quad (4.78)$$

Dabei gilt an den Rändern $\eta = 0$ und $\eta = 1$:

$$\eta = 0 : \dot{M}_{K,w} = \dot{M}_{\eta=0} \quad (4.79)$$

$$\eta = 1 : \dot{M}_{K,e} = \dot{M}_{\eta=1} \quad (4.80)$$

Im hier betrachteten Fall der Lacktrocknung auf einem Probeblech und unter Verwendung des in Abbildung 4.1 (Kapitel 4.1) dargestellten Relativkoordinatensystems gilt unter Vorgabe Neumannscher Randbedingungen $\dot{M}_{\eta=0} = 0$ und $\dot{M}_{\eta=1} = \sum_i \dot{M}_i$.

Die Dichte berechnet sich wie oben angegeben unter Verwendung von Gleichungen (4.74) und (4.75). Die aufgestellten Gleichungen für die Dichte ρ können in Gleichung (4.78) eingesetzt werden. Am Rand wird für die Dichte der Wert aus dem Zellmittelpunkt der Randzelle übernommen. Die daraus resultierende Gleichung wird nach der Massenstromdifferenz aufgelöst.

Transportgleichung und Kontinuitätsgleichung sind damit räumlich diskretisiert und können als lineares Gleichungssystem nach der zeitlichen Diskretisierung, wie in Kapitel 4.7 dargelegt, gelöst werden.

4.6.2. Diskretisierung des Strömungsgebietes

Neben dem Lackfilm müssen auch die den Film umgebende Gasphase sowie die Oberfläche und gegebenenfalls das Volumen des Substrates räumlich aufgelöst werden. Abbildung 4.5a zeigt ein ebenes Probeblech bei Parallelanströmung in positiver x -Koordinatenrichtung. Das Z-Blech wird, je nach Versuchsbedingungen, in positiver und negativer x -Koordinatenrichtung angeströmt (Abbildung 4.5b). Bei beiden Gittern wurde die Symmetrieebene in Strömungsrichtung bei der Gittergenerierung genutzt. Bei der Modellierung des Prallströmversuches mit ebenem Probeblech (Abbildung 4.5c) werden zwei Symmetrieebenen verwendet. Die Anströmung erfolgt bei der Prallströmung in negativer z -Koordinatenrichtung. Die als isotherm angenommenen Wände sind in den Abbildungen 4.5a - 4.5c ausgeblendet.

Um die Wärme- und Stoffübergänge insbesondere an der Oberfläche des Substrates in der Simulation korrekt abzubilden, muss die verwendete Gitterauflösung den Anforderungen der Turbulenzmodelle und der Wandfunktionen genügen. Das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Gitterauflösung stellt der dimensionslose Wandabstand y^+ dar [4]. Dieser ist wie folgt definiert:

$$y^+ \equiv \rho u_\tau \frac{y}{\nu} \quad (4.81)$$

Dabei ist ν die kinematische Viskosität, y der Zellknotenabstand normal zur Wand und u_τ die mit der Wandschubspannung τ_W wie folgt definierte Schubspannungsgeschwindigkeit:

$$u_\tau \equiv \sqrt{\tau_W / \rho} \quad (4.82)$$

Aufgrund der niedrigen Anströmgeschwindigkeiten (die mittlere Geschwindigkeit beträgt bei Anströmung im Prallströmungsversuch am Einlass mit Lochblende maximal $\bar{u}_{max} = 10$ m/s) ist die Reynolds-Zahl gering. Bei den Verwendeten Simulationen wurde das k - ϵ -Turbulenzmodells mit aktiviertem „Enhanced Wall Treatment“¹¹ angewendet, wobei die Grenzschicht an den Flächen mit Lackfilm stets aufgelöst wurde. Dort gilt $y^+ \approx 1$ [4]¹². Die Gesamthöhe der Grenzschicht berechnet sich dabei wie folgt:

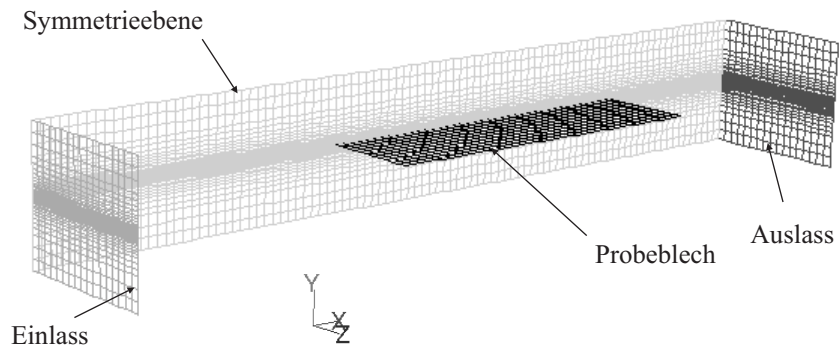
$$z_{ges} = \sum_{i=0}^n z_0 \cdot g^i \quad (4.83)$$

Dabei ist z_0 die Höhe der ersten Zelle in der Grenzschicht an der Wand, i der Index der Zellen in der Grenzschicht ausgehend von der Wand sowie g ein skalarer Vergrößerungsfaktor. Tabelle 4.3 gibt für die modellierten Strömungsgebiete die jeweiligen Grenzschichtauflösungen und die daraus resultierenden Werte für y^+ im Standardversuch auf Blechober- und unterseite an.

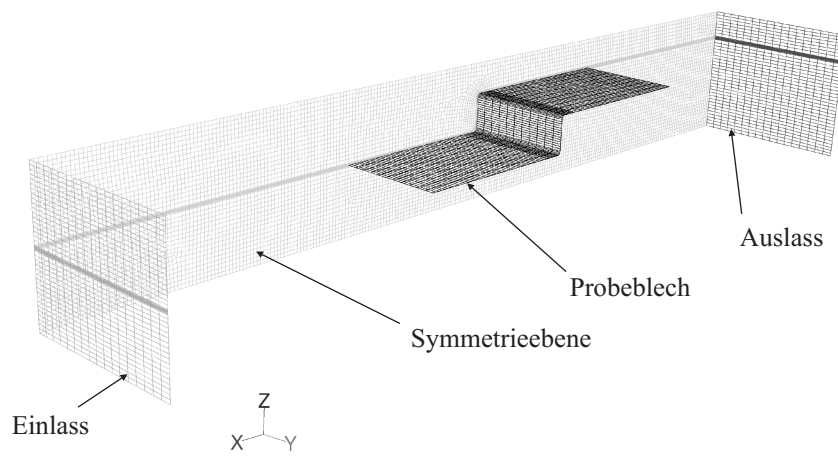
Zur Charakterisierung der Anströmungsbedingungen werden in Tabelle 4.3 die für den Temperaturbereich von 25...70 °C gemittelten Reynolds-Zahlen Re und Prantl-Zahlen Pr angegeben. Beim ebenen Blech ist die charakteristische Länge gleich der Länge des

¹¹Beim „Enhanced Wall Treatment“ wird vom Simulationsprogramm ermittelt, ob in Wandnähe genug Zellen vorliegen, um die Grenzschicht abzubilden ($y^+ < 5$), bzw. ob eine Wandfunktion gültig ist ($y^+ > 30$). Für den Zwischenbereich ($5 < y^+ < 30$) wird eine Blendfunktion angewendet. Dennoch sollte $5 < y^+ < 30$ vermieden werden und die Grenzschicht entweder voll aufgelöst werden ($y^+ \approx 1$) oder eine Wandfunktion mit $y^+ \approx 30$ angewendet werden.

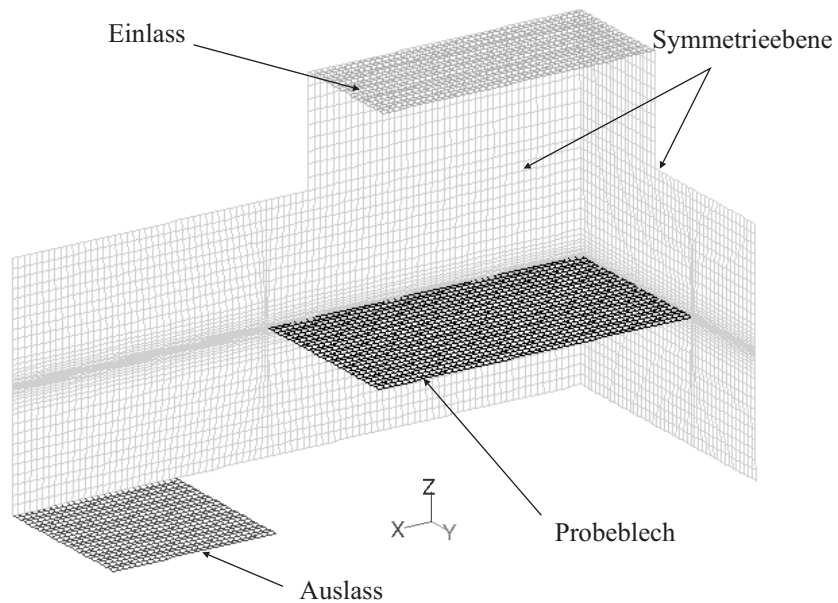
¹²FLUENT User's Guide, Kapitel 12.3, Enhanced Wall Treatment



(a) Gitter Parallelströmung, ebenes Blech



(b) Gitter Parallelströmung, Z-förmiges Blech



(c) Gitter Prallströmung, ebenes Blech

Abbildung 4.5.: Numerische Gitter unterschiedlich konfigurierter Messzellen

Blech in Anströmungsrichtung, beim Z-Blech und der Prallströmung wird der hydraulische Durchmesser $d_h = 4 \cdot A/U$ als charakteristische Länge eingesetzt. Daraus resultieren für das Z-Blech und die Prallanströmung niedrigere Reynolds-Zahlen als beim Parallelströmungsversuch. Die Reynoldszahl ist daher für diese Versuche nur bedingt aussagekräftig.

Anströmungsform Substratgeometrie	Einheit	parallel eben	parallel Z-förmig	prall eben
Höhe 1. Zelle z_0	[mm]	0,1	0,2	0,3
Vergrößerungsfaktor g	[—]	1,2	1,2	1,2
Anzahl der Zellen i	[—]	20	4	10
Gesamthöhe z_{ges}	[mm]	18,8	1,1	7,8
Elementkantenlänge (ca.)	[mm]	10	10	4
Wertebereich y^+	[—]	0,21...0,58	0,05...2,76	0,12...2,13
Wertebereich y^*	[—]	0,21...0,58	0,05...2,73	0,13...2,13
Charakteristische Länge	[mm]	$L = 200$	$d_h = 101$	$d_h = 101$
Reynolds-Zahl	[—]	11062	5638	5638
Prandtl-Zahl	[—]	0,71	0,71	0,71

Tabelle 4.3.: Grenzschichtvernetzung

Zur Berechnung von Wärme- und Stofftransport greift FLUENT auf eine zu Gleichung (4.81) alternative Definition des dimensionslosen Wandabstandes zurück. Dieser ist wie folgt definiert [4]:

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\nu} \quad (4.84)$$

Darin beträgt die Turbulenzkonstante $C_\mu = 0,09$, k_P ist die turbulente kinetische Energie am Punkt P und y_P der Wandabstand zu P . Die y^* -Werte unterscheiden sich bei den durchgeführten Trocknungssimulationen im Betrag nur geringfügig von den y^+ -Werten.

4.6.3. Diskretisierung des Substrates

Bei Karosserieblechen kann von einem großen Oberflächen- zur Wanddickenverhältnis ausgegangen werden. Die Blechdicken liegen in einem Bereich von $0,5 \dots 1,0$ mm und ändern sich über die Fläche hinweg nur geringfügig. Daher wird auf eine Auflösung der Bleche mittels finiter Volumenelemente verzichtet. Statt dessen wird das „Shell-Conduction-Model“ (Schalenmodell) verwendet. Dabei wird der Wand eine virtuelle Dicke zugewiesen und innerhalb Wand die eindimensionale Wärmeleitgleichung gelöst. Je Iterations- oder Zeitschritt wird die mittlere Temperatur in der Wandmitte gespeichert. Das Trocknungsmodell kann jedoch auch auf Oberflächen von Solid-Elementen ausgeführt werden. Dies wird exemplarisch bei der Beschreibung der Trocknung kontinuierlich bewegter Güter bei zeitlich und räumlich quasi-konstantem Luftzustand am Beispiel des Prallstrahl-Bandrockners in Kapitel 6.3 demonstriert. Die Kantenlänge der Oberflächenelemente bei der Vernetzung des Probebleches nach Abbildung 4.5a-c beträgt circa 5 mm.

4.7. Zeitliche Diskretisierung

Der in Gleichung (4.39) enthaltene Term $\frac{\partial X}{\partial \tau}$ wird explizit formuliert durch $\frac{\Delta X}{\Delta \tau}$ und berechnet sich aus der Änderung der Masse im Lackfilm bezüglich des vorherigen Zeitschrittes. Diese Vorgehensweise bedingt ausreichend kleine Zeitschrittweiten (Kapitel 5.4). Die Änderung der Dichte wird in jedem Kontrollvolumen für den Zeitschritt $l + 1$ durch

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{\rho^{l+1} - \rho^l}{\tau^{l+1} - \tau^l} = \frac{\Delta \rho}{\Delta \tau} \quad (4.85)$$

berechnet. Nach dem Differenzieren des zeitabhängigen Terms und durch weiteres Umstellen ergibt sich:

$$\rho \frac{\partial \xi_i}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{X} \left(\dot{M}_K \xi_i - \frac{\rho D_i}{X} \frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} - \rho \xi_i \eta \frac{\Delta X}{\Delta \tau} \right) \right] + \xi_i \left(\frac{1}{X} \rho \frac{\Delta X}{\Delta \tau} + \frac{\Delta \rho}{\Delta \tau} \right) = 0 \quad (4.86)$$

Für Gleichung (4.45) folgt mit den explizit vorgegebenen Termen $\frac{\Delta X}{\Delta \tau}$ und $\frac{\Delta \rho}{\Delta \tau}$:

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta \tau} - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta \frac{\rho}{X} \frac{\Delta X}{\Delta \tau} - \frac{1}{X} \dot{M}_K \right) + \frac{\rho}{X} \frac{\Delta X}{\Delta \tau} = 0 \quad (4.87)$$

Die Erhaltungsgleichungen 4.86 und 4.87 sind im Trocknungsmodell je Kontrollvolumen mit dem Knotenpunkt P in Abhängigkeit von P und den angrenzenden Kontrollvolumina mit den Knotenpunkten W und E formuliert. Hat das Gitter im Lackfilm n Kontrollvolumina, so müssen auch n Gleichungen zum Stofftransport der Komponente i gelöst werden. Die Unbekannten sind dabei ξ_E , ξ_P und ξ_W in Gleichung 4.86. Die Gleichungssysteme haben in Matrizenschreibweise jeweils die Form

$$\mathbf{M}\dot{\Phi} + \mathbf{K}\Phi = \mathbf{f} \quad (4.88)$$

Zur Zeitintegration wird die „generalisierte Trapezmethode“ nach *Hughes* [47] verwendet. \mathbf{M} wird als „Speichermatrix“ benannt und ist eine einfache Diagonalmatrix. Die Matrix \mathbf{K} wird „Leitmatrix“ genannt und ist eine Tridiagonalmatrix. \mathbf{f} ist der „Lastvektor“ und ergibt sich aus den von Φ und $\dot{\Phi}$ unabhängigen Termen aus Randbedingungen und Quelltermen. Φ ist Massenanteil und $\dot{\Phi}$ die zeitliche Änderung des Massenanteils der Komponente i . Zur Lösung ist die Vorgabe einer Initialbedingung

$$\Phi(0) = \Phi_0 \quad (4.89)$$

zum Zeitpunkt $\tau = 0$ notwendig. Für den Zeitschritt $l + 1$ gilt mit der Näherung \mathbf{v}^{l+1} für $\dot{\Phi}$:

$$\mathbf{M}\mathbf{v}^{l+1} + \mathbf{K}\Phi^{l+1} = \mathbf{f}^{l+1} \quad (4.90)$$

Dabei wird Φ^{l+1} wie folgt approximiert:

$$\Phi^{l+1} = \Phi^l + \Delta \tau \mathbf{v}^{l+\alpha} \quad (4.91)$$

mit

$$\mathbf{v}^{l+\alpha} = (1 - \alpha)\mathbf{v}^l + \alpha\mathbf{v}^{l+1} \quad (4.92)$$

Setzt man Gleichung (4.92) in (4.91) ein, so erhält man

$$\Phi^{l+1} = \Phi^l + \Delta \tau (1 - \alpha)\mathbf{v}^l + \alpha \Delta \tau \mathbf{v}^{l+1} \quad (4.93)$$

Die vom Zeitschritt l abhängigen Summanden werden zum Prädiktor $\tilde{\Phi}^{l+1}$ zusammengefasst.

$$\Phi^{l+1} = \tilde{\Phi}^{l+1} + \alpha \Delta\tau \mathbf{v}^{l+1} \quad (4.94)$$

Setzt man Gleichung (4.94) in (4.90) ein, so erhält man ein lineares Gleichungssystem:

$$\left(\frac{1}{\alpha \Delta\tau} \mathbf{M} + \mathbf{K} \right) \Phi^{l+1} = \mathbf{f}^{l+1} + \frac{1}{\alpha \Delta\tau} \mathbf{M} \tilde{\Phi}^{l+1} \quad (4.95)$$

Der Parameter α kann unterschiedliche Werte im Intervall $[0, 1]$ annehmen. Für alle $\alpha \neq 0$ handelt es sich um implizite Verfahren zur Zeitintegration. Drei dieser Verfahren haben eigene Namen, wie in Tabelle 4.4 vermerkt.

α	Methodenname
0	Vorwärtsdifferenz, Euler-Vorwärts
$\frac{1}{2}$	Crank-Nicolson
1	Rückwärtsdifferenz, Euler-Rückwärts

Tabelle 4.4.: Zeitdiskretisierungsverfahren

Gilt $\alpha = 0$, wird ein stabiles, explizites Verfahren zur Zeitdiskretisierung angewendet. Da die Werte des neu zu berechnenden Zeitschrittes Φ^{l+1} nur von den Werten im Zeitschritt Φ^l abhängen, wird das angewendete Diskretisierungsverfahren als Einschrittverfahren bezeichnet. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wurde eine Zeitschrittweite von $\Delta\tau = 0,1$ s bzw. $\Delta\tau = 1,0$ s verwendet und ist für die Strömungssimulation und das Trocknungsmodell gleich. Der Einfluss der Zeitschrittweite auf die Ergebnisse wird in Kapitel 5.4.2 näher betrachtet.

4.8. Umsetzung in FLUENT

Zur Ankopplung des Trocknungsmodells an FLUENT werden verschiedene Schnittstellen, so genannte *User-Defined-Functions*, verwendet. Tabelle 4.5 gibt eine Übersicht über die bei dem Trocknungsmodell verwendeten Schnittstellen.

Funktionstyp	Funktionsaufgaben
DEFINE_PROPERTY	Vorgabe der temperaturabhängigen Stoffdaten ρ_i , λ_i , und η_i für die Gasphase. Die Polynomparameter für D_{ij} und $c_{p,i}$ werden direkt im GUI vorgegeben.
DEFINE_PROFILE	Vorgabe der Massenkonzentrationen des Lackfilms an der Oberfläche sowie des Wärmestromes durch die Verdunstung
DEFINE_ON_DEMAND	Speicherallokation und Initialisierung des Lackfilms vor Beginn der Simulation
DEFINE_EXECUTE_AT_END	Ausführung des Trocknungsmodells am Ende eines Zeitschrittes im CFD-Solver
DEFINE_RW_FILE	Schreiben und Lesen von globalen Modellparametern in die FLUENT-Modellinformationsdatei (*.cas) bzw. FLUENT-Datendatei (*.dat)
DEFINE_GRID_MOTION	Änderung der Position von Gitterknoten. Diese UDF wird nur bei der Trocknungssimulation kontinuierlich bewegter Güter in einem Durchlaufkonvektionstrockner (Bandtrockner, Kapitel 6.3) verwendet.

Tabelle 4.5.: Verwendete User-Defined-Functions

4.9. Vorgabe der Initial- und Randbedingungen

Zum Starten der Aufheiz- und Trocknungssimulation müssen geeignete Randbedingungen gewählt und Initialbedingungen vorgegeben werden. Die in Abbildung 4.6 dargestellte Vorgehensweise bezieht sich auf die Simulationen zu den durchgeführten Experimenten, wie in Kapitel 5.2 beschrieben.

Unter Vorgabe der korrekten Randbedingungen wird das Strömungsgebiet zunächst stationär simuliert, bis die Lösung konvergiert. Randbedingungen sind die Wandtemperaturen sowie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Geschwindigkeit der Einlassströmung. Anschließend wird zu Beginn einer Aufheizsimulation das Probeblech in der Messzelle auf die gewünschte Initialtemperatur, bekannt aus dem jeweiligen Versuch, gesetzt. Dieser Vorgang wird als „patchen“ bezeichnet. Nach Umstellen des Solvers auf ein transientes Gleichungssystem kann mit der eigentlichen Berechnung des Aufheizens des Probebleches begonnen werden.

Beim Initialisieren eines Trocknungsversuches wird analog zum Aufheizversuch vorgegangen. Zusätzlich wird dabei nach dem patchen der Temperatur des Probebleches der Lackfilm auf dem Blech initialisiert. Dazu wird eine *User-Defined-Funktion*

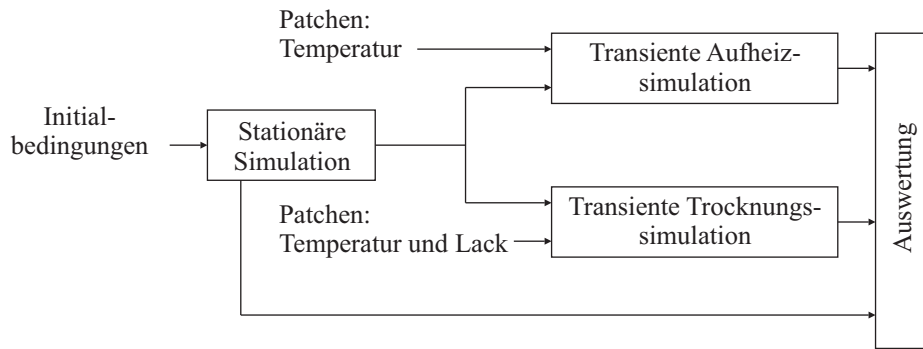


Abbildung 4.6.: Simulationsablauf

„DEFINE_ON_DEMAND“ verwendet. Diese initialisiert die allokierten Speicherplätze je Kontrollvolumen (*User-Defined-Memories*, *UDM*) und füllt diese mit den Initialwerten des Lackfilms. Die Vorgabe der Initialwerte erfolgt über ein „Scheme“-Programmierschnittstelle (Abbildung 6.1, Kapitel 6.1). Anschließend werden eine *User-Defined*-Funktion „DEFINE_PROFILE“ für den Wärmestrom (Gleichung (4.46)) und zwei *User-Defined*-Funktionen für die Lösemittelkonzentrationen (Gleichung (4.61)) am Probeblech auf den entsprechenden Oberflächen als Randbedingung vorgegeben. Für den Lackfilm wird initial (Gleichung (4.89)) eine konstante Konzentrationsverteilung über die Schichtdicke angenommen. Diese Annahme ist nach Böhm [7] gerechtfertigt. Der Transport- und Einlegevorgang der Probebleches in die Messzelle wird vernachlässigt, da dieser nur von kurzer Dauer ist und nahezu vollständig bei Raumtemperatur erfolgt. Nach Umstellen des Solvers auf die transiente Lösung kann die Simulation gestartet werden.

4.10. Konvergenzkriterien

Zum Abbruch der Lösung der Gleichungen je Zeitschritt muss ein Konvergenzkriterium gewählt werden. Als Konvergenzkriterium wird der skalierte, absolute Fehler entsprechend dem *FLUENT User's Guide* verwendet [4]¹³

Tabelle B.2 (Anhang B) zeigt für das jeweils zu lösende Gleichungssystem die Standard-Werte für den absoluten Fehler sowie zwei modifizierte Wertesätze. Nach diesen durchläuft die Rechnung entweder alle vorgegebenen Iterationsschritte (Satz I), entsprechend dem „none“-Konvergenzkriterium. Satz II erfüllt nach fortgeschrittener Simulationszeit das Kriterium und benötigt somit weniger Iterationsschritte innerhalb eines Zeitschrittes.

In der vorliegenden Arbeit wurden 20 Iterationen je Zeitschritt vorgegeben.

4.11. Zweischichtlackierung mit idealer Durchmischung

Da der Trocknungsvorgang der Lackschicht schon während der Lackapplikation einsetzt, ist es wünschenswert, für spätere Simulationen den Applikationsvorgang mit einzubeziehen. Aus diesem Grund wurde bei der Implementierung des Trocknungsmodells eine UDF-Schnittstelle vorgesehen, mit der ein von außen applizierter Lackmassenstrom berücksich-

¹³FLUENT User's Guide, Kapitel 26, Gleichung 26.13-4

tigt werden kann. Abbildung 4.7 veranschaulicht die Applikation einer Lackschicht auf ein unbeschichtetes Substrat, eine anschließende Trocknung, die Applikation einer weiteren Lackschicht mit wiederum darauffolgender Trocknung.

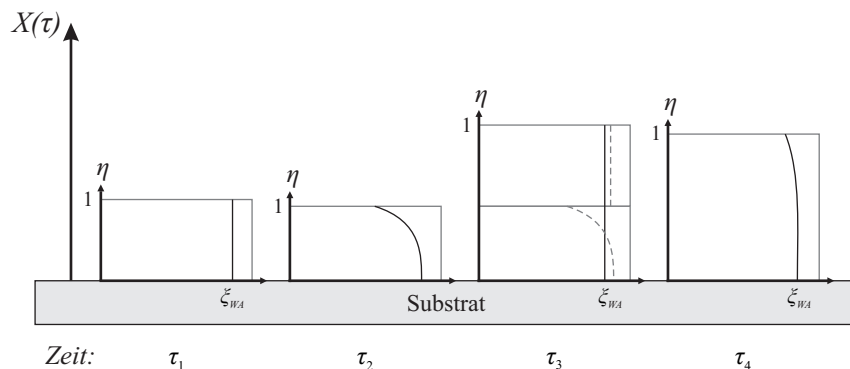


Abbildung 4.7.: Trocknung von zwei nacheinander applizierten Schichten mit idealer Durchmischung

Zum Zeitpunkt τ_1 wird das Substrat mit einem Lackmassenstrom beaufschlagt. Die Konzentration unmittelbar nach der Applikation wird über die Filmhöhe konstant angenommen, wie von Böhm [7] näher beschrieben. Die Trocknung beginnt unmittelbar nach der Applikation. Zum Zeitpunkt τ_2 hat die Konzentration des Leichtsieders, in diesem Fall also Wasser ξ_{WA} , im oberen Bereich des Films durch Verdunstung abgenommen. Nun wird erneut Lack appliziert (τ_3). Ist die Trocknung noch nicht weit fortgeschritten, wird durch den Impulseintrag der Applikation die frisch applizierte Lackmasse mit der schon geringfügig getrockneten Lackmasse homogen vermischt [73]. Es kann wiederum von einer konstanten Konzentration und damit einer idealen Durchmischung über die Schichtdicke ausgegangen werden, die allerdings im Vergleich zur Ausgangsmischung etwas niedriger ausfällt. Zum Zeitpunkt τ_4 hat sich schließlich die Konzentration im oberen Filmbereich wiederum durch Verdunstung verringert.

Der beschriebene Ablauf kann mehrfach wiederholt werden. Damit ist es möglich, einen Lackaufbau auf den Oberflächenzellen durch ein geeignetes Spraymodell, wie beispielsweise von Poppner [73] beschrieben und implementiert, an die Trocknungssimulation anzukoppeln. Damit kann eine „Nass-in-nass“-Applikation abgebildet werden (Kapitel 5.5.5).

4.12. Zweischichtlackierung ohne Durchmischung

Im Verlauf des Lackierprozesses einer Karosserie werden mehrere Lackschichten nacheinander aufgebracht. Diese sind, neben einer oder mehreren farbgebenden Basislackschichten, auch der darunterliegende Tauchlack, der Füller sowie der auf den Basislack applizierte, den Schichtaufbau abschließende Klarlack. Die Stoffeigenschaften eines getrockneten Lacks unterscheiden sich erheblich von der nicht getrockneten Topfmischung¹⁴.

Um bei der Applikationssimulation automatisiert zwischen der homogenen Durchmischung des Lackfilms bei der Applikation (Kapitel 4.11) und einer Applikation eines Filmes auf einer schon getrockneten Lackschicht unterscheiden zu können, wird im Trocknungsmodell

¹⁴Die *Topfmischung* ist die Zusammensetzung des Lackes im Auslieferungszustand vom Hersteller innerhalb der Genauigkeit der Lackrezeptur.

ein Filmbildungsgrad ϖ eingeführt. Dieser berücksichtigt den Fortschritt der Filmbildung bei der Dispersionstrocknung. Zusätzlich kann für den getrockneten Film ein anderer Diffusionskoeffizient vorgegeben werden.

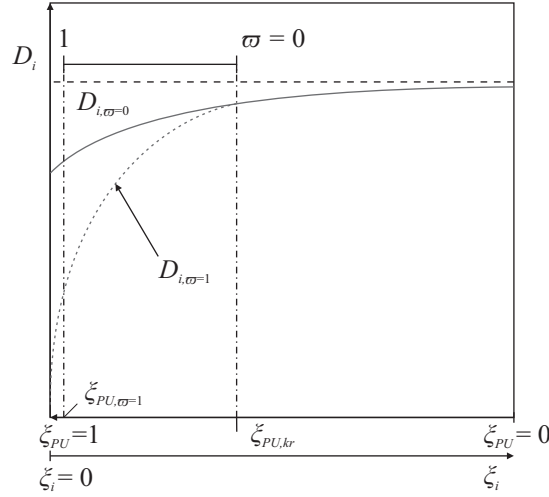


Abbildung 4.8.: Einfluss des Filmbildungsgrades auf den Diffusionskoeffizienten

Abbildung 4.8 zeigt exemplarisch die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten vom Filmbildungsgrad. Unterschreitet die Polyurethankonzentration im Lackfilm einen bestimmten Wert $\xi_{PU,kr}$, wird der Diffusionskoeffizient aus dem gewichteten Mittelwert des Diffusionskoeffizienten aus der flüssigen Phase $D_{i,\varpi=0}$ und dem Diffusionskoeffizienten der festen Phase $D_{i,\varpi=1}$ gebildet. Der Diffusionskoeffizient hängt damit von der Konzentration ξ_i , der Temperatur T und dem Filmbildungsgrad ϖ ab:

$$D_i = f(\xi_i, T, \varpi) \quad (4.96)$$

Der Filmbildungsgrad ist wiederum eine Funktion der Polyurethankonzentration ξ_{PU} im Lackfilm sowie der Temperatur $T(\tau)$, mit welcher der Lackfilm über die Trocknungsdauer beaufschlagt wurde.

$$\varpi = f(\xi_{PU}, T(\tau)) \quad (4.97)$$

Da über den Filmbildungsgrad keine experimentellen oder analytischen Ergebnisse vorliegen, wird von einer linearen Abhängigkeit unterhalb einer kritischen Polyurethankonzentration ausgegangen. Eine Abhängigkeit von der Temperaturhistorie wird vernachlässigt. Es gilt somit:

$$D_{i,\varpi} = \{(1 - \varpi)D_{i,\varpi=0} + \varpi D_{i,\varpi=1}\}_{\xi_{PU} > \xi_{PU,kr}} \quad (4.98)$$

Durch den Filmbildungsgrad wird gewährleistet, dass sich eine zuvor getrocknete Lack-schicht bei steigender Lösemittelkonzentration nicht wie die Topfmischung verhält. Der Filmbildungsgrad der Topfmischung des Lackes ist $\varpi = 0$. Wird nun eine getrocknete Lack-schicht mit einem Massenstrom, etwa durch eine Applikationssimulation, beaufschlagt, so wird über den gesamten Film mit $\varpi = 0$ nach der Applikation nur von einer homogenen Mischung ausgegangen (Kapitel 4.11), wenn im gesamten, bereits getrockneten Film der Filmbildungsgrad $\varpi = 0$ ist. Gilt in der oberen Filmschicht $\varpi \neq 0$ wird hingegen

die ursprüngliche Konzentrationsverteilung beibehalten und eine neue Lackschicht auf eine schon vorhandene Schicht „aufgesetzt“, und damit keine ideale Durchmischung beider Filme angenommen.

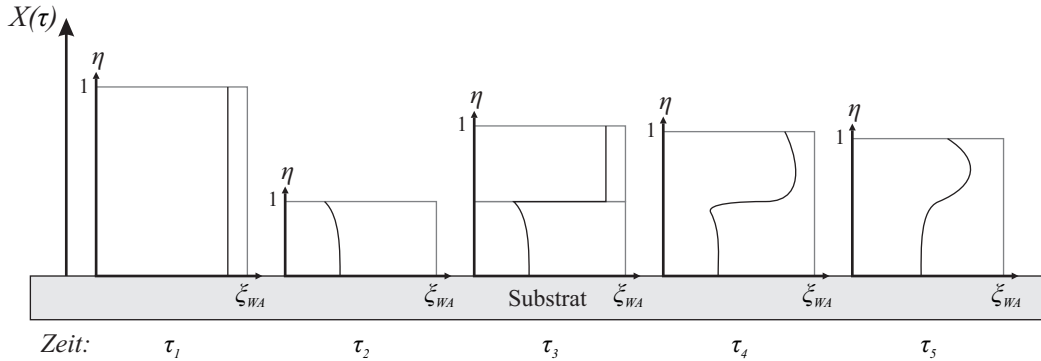


Abbildung 4.9.: Trocknung von zwei nacheinander applizierten Lackschichten ohne Durchmischung

Abbildung 4.9 zeigt schematisch die Konzentration von Wasser bei der Trocknung von zwei nacheinander applizierten Lackfilmen. Zum Zeitpunkt τ_1 ist der erste Film appliziert und beginnt zu trocknen. Es wird angenommen, dass bei der Trocknung zum Zeitpunkt τ_2 die kritische Konzentration $\xi_{PU,kr}$ im gesamten Film überschritten wird. Über den gesamten Film gilt dann somit auch $\varpi > 0$. Bei der Applikation einer weiteren Lackschicht (Zeitschritt τ_3) kann nur in der oberen, gerade neu applizierten Schicht von einer homogenen Mischung ausgegangen werden. Nach der Applikation trocknet der Film weiter. Zum Zeitpunkt τ_4 kurz nach der neuen Applikation wird im oberen Teil des Filmes mit dem neu applizierten Lackmaterial die kritische Konzentration $\xi_{PU,kr}$ zunächst noch nicht unterschritten. Durch Rückdiffusion in den zuerst applizierten Film nimmt der Wasseranteil im unteren Filmbereich zu (Zeitschritt τ_5). Obgleich nun die Konzentration ξ_{PU} im zuerst applizierten Film teilweise wieder fällt, bleibt der Filmbildungsgrad für die weitere Berechnung erhalten.

Mit dieser Modellierungsmethode ist es möglich, die Abfolge von Applikation und Trocknung mehrerer Lackschichten simulativ abzubilden. Dies ist beispielsweise notwendig, wenn mehrere Schichten Basislack appliziert und anschließend getrocknet werden. In Kapitel 5.5.6 werden hierzu Ergebnisse der Berechnungen diskutiert.

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den durchgeführten Experimenten und Simulationen miteinander verglichen und diskutiert. Dabei wird unter einem Aufheizversuch ein experimenteller Versuch bzw. Simulation verstanden, bei dem ein unbeschichtetes Probeblech in die Messkammer eingelegt wird. Bei einem Trocknungsversuch hingegen ist das Blech mit einer einseitig applizierten Lackschicht versehen. Neben dem Vergleich von Experiment und Simulation werden in diesem Kapitel auch weiterführende Untersuchungen zum Trocknungsmodell vorgestellt.

5.1. Aufheizversuche

5.1.1. Wärmeeintrag in das Probeblech

Der Einfluss verschiedener Anströmungsbedingungen in der Messzelle sowie der Probengeometrie auf das zeitliche Aufheizverhalten, also den Wärmeeintrag in das Probeblech, ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

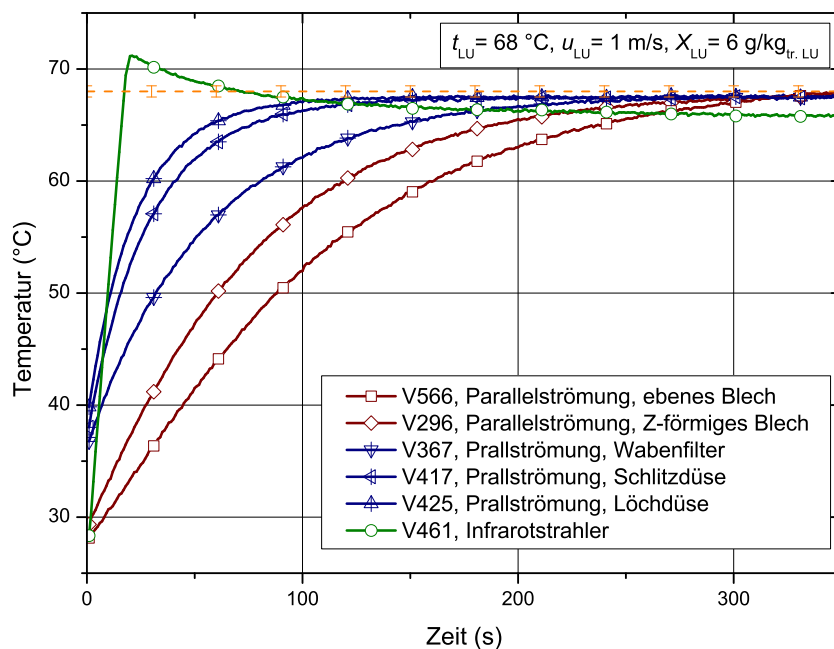


Abbildung 5.1.: Aufheizversuche - variierende Strömungsbedingungen

Bei Parallelanströmung dauert es mehr als 300 s, bis das Probeblech am Messpunkt in der Mitte des Probebleches die Anströmungstemperatur im Rahmen der Messgenauigkeit von $\pm 1 \text{ K}$ erreicht (Versuch V566). Eine schnellere Erwärmung kann beim Z-Blech

festgestellt werden (V296). Durch die Prallanströmung kann ein noch schnelleres Erwärmen des Probebleches herbeigeführt werden. Dabei spielt erwartungsgemäß die verwendete Einlassgeometrie ebenfalls eine Rolle (V367, V417, V425).

Wird an die Messzelle noch eine zusätzliche Strahlungsquelle angebracht, kann nach Einschalten der Strahlungsquelle bei gleichzeitiger Anströmung des Probebleches der Aufheizvorgang noch beschleunigt werden. So wurde in Versuch V461 schon nach 18 s die Anströmungstemperatur erreicht. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Infrarotstrahler mit einer Leistung von 1000 W ausgeschaltet, jedoch wird durch das Abkühlen der Strahlungswendeln zunächst noch mehr Energie in die Messzelle eingebracht, und somit die Strömungstemperatur überschritten. Aufgrund von Strahlungsverlusten durch die nicht beheizte infrarottransparente Scheibe an der Decke der Messzelle stellt sich bei Versuch V461 nach 300 s eine Gleichgewichtstemperatur auf dem Probeblech ein, die etwas unterhalb der eigentlichen Anströmungstemperatur liegt.

Die Versuche zeigen den großen Einfluss der Probengeometrie und der Anströmungsform auf den Wärmeeintrag in das Probeblech. Durch eine zusätzliche Strahlungsquelle kann der Wärmeeintrag nochmals deutlich gesteigert werden.

5.1.2. Temperaturverteilung

Die Vorhersagen der Simulation bezüglich der lokalen Temperaturverteilung auf einem ebenen Probeblech im Aufheizversuch wurden anhand von Experimenten verifiziert. Die Temperaturverteilung wurde mit einem Probeblech erfasst, das mit thermochromischen Flüssigkristallen (Thermochromic Liquid Crystals, TLC) der Firma *Hallcrest* präpariert wurde.

Bei den TLCs handelt es sich um temperatursensitive Flüssigkristalle, die sich bei der Temperaturmessung in der Mesophase, einem Zustand zwischen kristallinem Festkörper und isotroper Flüssigkeit, befinden. Mechanisch verhalten sich TLCs in diesem Zustand wie Flüssigkeiten, weisen jedoch die optische Eigenschaften wie Festkörper auf. Die optischen Eigenschaften hängen unter anderem von der Temperatur ab. Bei niedriger Temperatur liegen die TLCs in kristalliner Phase vor. Bei Temperaturerhöhung verändern die Moleküle schichtweise ihre Orientierung um einen charakteristischen Winkel, dabei entsteht eine Spiralstruktur. Diese Phase wird als chiral nematisch bzw. cholesterisch bezeichnet. Die Spiralstruktur reflektiert das Licht in Abhängigkeit der Temperatur selektiv über einen bestimmten Temperaturbereich. Bei einer weiteren Temperaturerhöhung geht die Orientierung der Kristalle in der Spiralstruktur verloren, es liegt nun die flüssige Phase vor. Die verwendeten TLCs sind sowohl in der flüssigen als auch in der kristallinen Phase transparent. In der cholesterischen Phase erscheinen sie bei niedriger Temperatur zunächst rot, bei höherer Temperatur blau. Eine eingehendere Beschreibung zur Messung von Temperaturen auf Oberflächen mit TLCs liefern insbesondere *Höhm* [46] sowie zum physikalischen Hintergrund die Firma *Hallcrest* [41].

Die Firma *Hallcrest* liefert die TLCs unter anderem auf einem schwarz eingefärbten Kunststoffträgermaterial aus. Diese wurden in drei Bereichen mit jeweils vier unterschiedlichen Temperatursensitivitätsbereichen auf das Probeblech geklebt (Abbildung 5.2a). Oberhalb der Messkammer wurde eine CCD Kamera installiert. Über ein Schutzglas ist das Blech in der Messzelle optisch zugänglich (Seite 20, Abbildung 3.1e).

Die aufgenommenen Sequenzen wurden mit einer Bildverarbeitungssoftware bearbeitet und an einzelnen Positionen der Farbtonwert (HUE) im HSV-Farbraum analysiert. Auf eine

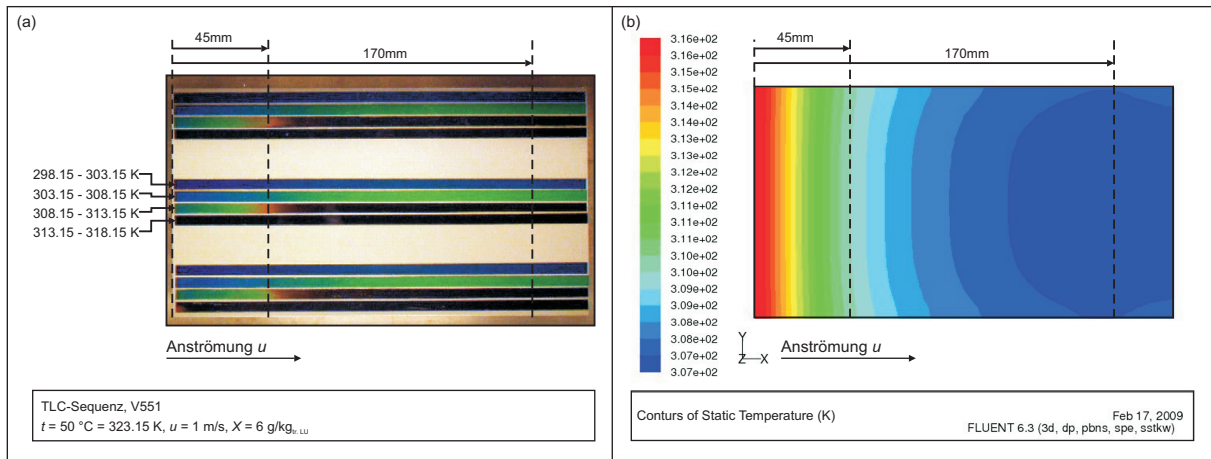


Abbildung 5.2.: Temperaturmessung mit thermochromischen Flüssigkristallen (a) und Vergleich mit Simulationsergebnissen (b)

absolute Farbton-Kalibrierung wurde jedoch verzichtet, da vordergründig die Temperaturverteilung auf dem Blech zwischen Experiment und Simulation verglichen werden sollten. Abbildung 5.2b zeigt die Ergebnisse der Simulation für das in Abbildung 5.2a dargestellte Blech nach einer Aufheizzeit von 60 s in der Messzelle. Eine Auswertung der Temperaturen in einem Abstand zur vorderen Blechkante von ca. 0 mm, 45 mm und 170 mm zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation.

An der vorderen Blechkante (ca. 0 mm) schlägt die Farbe des vierten TLC-Streifens gerade um, die Temperatur beträgt damit etwa 314 K. In der Simulation wird zu diesem Zeitpunkt an der vorderen Blechkante eine Temperatur von 316 K berechnet. Diese Differenz stellt die größte Abweichung dar. Bei 45 mm wird übereinstimmend von Experiment und Simulation eine Temperatur von ca. 310 K gemessen bzw. vorhergesagt. Im Abstand von 170 mm wird im Experiment eine Temperatur von 307...308 K gemessen. Die Simulation sagt eine Temperatur von 307 K voraus.

Die gemessenen Werte des Pyrometers ergeben eine gute quantitative Übereinstimmung mit den Temperaturen aus der TLC-Messung. Abbildung 5.3 zeigt beispielsweise einen Vergleich der Temperaturmessung mit TLCs und dem Pyrometer in der Blechmitte. Beide Messverfahren liefern übereinstimmende Temperaturwerte.

Neben Versuchen mit thermochromischen Flüssigkristallen wurde auch mit einer Infrarotkamera (Firma *Thermosensorik*, Typ PtSi 256) eine transient-räumliche Erfassung der Temperaturverteilung auf dem Probedblech mit einer Bildfrequenz von maximal 10 Hz mit einem Pixelraster des Sensors von $256 \text{ px} \cdot 256 \text{ px}$ und einem Spektralbereich von $1,5 \dots 5,4 \text{ } \mu\text{m}$ durchgeführt. Es wurden Infrarotaufnahmen von Aufheizversuchen und Trocknungsversuchen aufgenommen und anschließend jeweils 10 Bilder zu einem Bild gemittelt. Die effektive Aufnahmezeit beträgt daher 1 Hz, entsprechend der übrigen Datenaquisition an der Versuchsanlage. Der optische Zugang zum Probedblech wird durch das Einsetzen eines Ofenglasses vom Typ „Robax“ der Firma *Schott* gewährleistet. Dieses Ofenglas wird auch bei den Versuchen mit dem Infrarotstrahler verwendet. Zur Bestimmung der korrekten Temperatur des Probedbleches ist eine Kalibrierung notwendig. Der Transmissionsgrad des Ofenglasses beträgt allerdings lediglich maximal $d < 0,92$. Eine zuverlässige Kalibrierung ist daher nicht möglich. Die Ergebnisse der Infrarotversuche haben daher

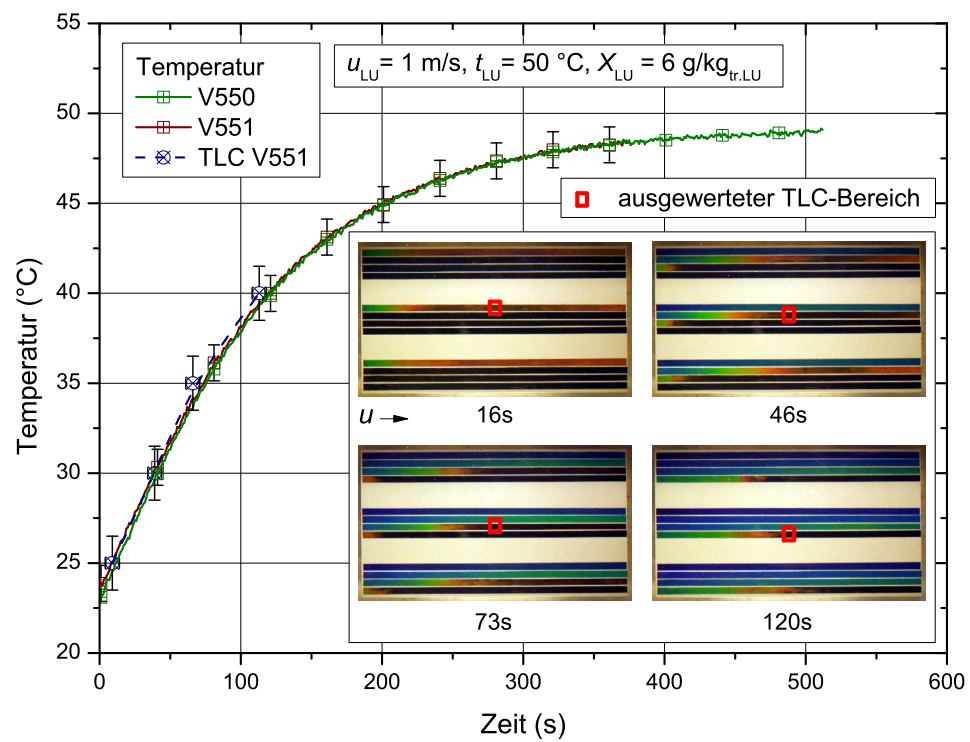


Abbildung 5.3.: TLC-Temperaturmessungen an Pyrometersmessstelle

nur eine qualitative Aussagekraft, die bereits von den TLC-Versuchen abgedeckt wird. Die Ergebnisse werden daher hier nicht weiter diskutiert.

5.2. Aufheiz- und Trocknungsvorgang - Simulation und Experiment

Im Folgenden werden Ergebnisse aus Experiment und Simulation für unterschiedliche Konfigurationen der Messzelle nach Abbildung 3.1 (Kapitel 3.1) vorgestellt und diskutiert. Tabelle 5.1 gibt die wichtigsten Parameter der simulativ nachgestellten Einsichtversuche wider.

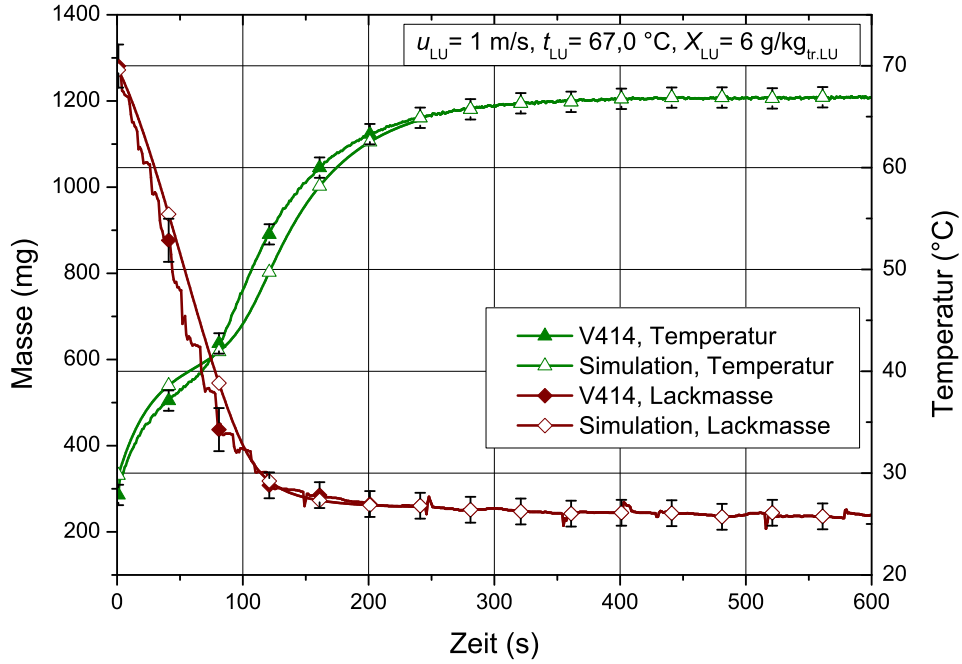
Trocknung				Aufheizen					
Nr.	T_0 [K]	T_2 [K]	M_0 [mg]	Nr.	T_0 [K]	T_2 [K]	u [$\frac{m}{s}$]	X_{LU} [$\frac{g}{kg}$]	Typ
V414	302,43	340,00	1281	V409	306,35	340,70	1,0	6	\perp , ML
				V367	309,90	341,13	1,0	6	\perp
V441	302,54	341,23	1203	V401	311,48	341,60	2,0	6	\perp , ML
V455	302,65	339,34	1206	V450	306,56	339,86	0,5	6	\perp , ML
V396	300,45	331,08	1295	V393	304,24	330,74	1,0	6	\perp , ML
V449	303,44	349,46	1261	V445	308,30	349,55	1,0	6	\perp , ML
V570	298,78	342,06	1308	V565	299,86	342,94	1,0	6	\parallel , ML
V576	300,65	342,19	1304	V571	302,35	342,10	1,0	6	\parallel , ML
V581	300,19	342,25	1356	V579	305,22	342,74	1,0	6	\parallel , ML
V562	296,51	323,27	1294	-			1,0	6	\parallel , ML
V559	294,02	298,00	1303	-			1,0	6	\parallel , ML
V307	300,23	341,80	1794	V295	300,42	340,70	1,0	6	$Z_{fw.}$, ML
-				V296	300,59	341,07	1,0	6	$Z_{fw.}$
-				V297	301,13	341,44	1,0	6	$Z_{fw.}$
V311	298,28	341,33	1824	V314	304,09	342,29	0,5	6	$Z_{fw.}$, ML
V318	299,35	342,77	1815	V320	305,37	341,78	2,0	6	$Z_{fw.}$, ML
V304	299,79	342,22	1780	V300	302,78	341,67	1,0	6	$Z_{bw.}$, ML
-				V550	296,25	323,25	1,0	6	TLC
-				V551	297,03	323,31	1,0	6	TLC
V182	298,69	340,88	1202	-			1,0	6	\perp , RL
V226	298,36	342,30	1208	-			1,0	6	\perp , RL
T_0	Temperatur des Blechs beim Einlegen bzw. Simulationsbeginn								
T_2	Anströmungstemperatur in der Messzelle								
M_0	Lackmasse bei Mess- bzw. Simulationsbeginn								
u	Anströmgeschwindigkeit				X_{LU}	absolute Luftfeuchtigkeit			
ML	Modelllacksystem				RL	Reallacksystem			
\perp	Prallanströmung				\parallel	Parallelanströmung			
$Z_{fw.}$	Z-Blech, forward facing step flow				$Z_{bw.}$	Z-Blech, backward facing step flow			
TLC	Temperaturmessung mittels thermochromischer Flüssigkristalle								

Tabelle 5.1.: Start- und Randbedingungen aus den Experimenten für die Simulationen

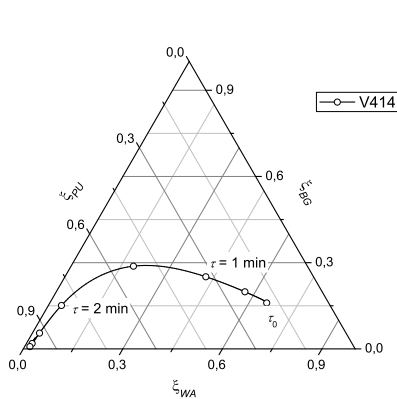
Eine Übersicht bezüglich der Variationen der Strömungsparameter (Geschwindigkeit u und Temperaturniveau T) ist in Tabelle 3.1 (Kapitel 3) gegeben.

5.2.1. Modelllack auf ebenem Blech in Prallanströmung

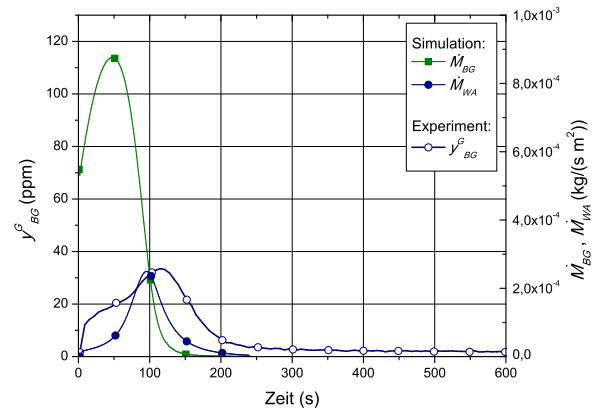
Abbildung 5.4a zeigt den Vergleich von Experiment und Simulation für ein ebenes Probeblech in einer Prallströmung bei Standardbedingungen (Versuch V414). Die Massenabnahmecharakteristik wird von der Simulation richtig wiedergegeben. Die Steigung am Temperaturhaltepunkt fällt in der Simulation etwas geringer aus als im Experiment gemessen. Daraus resultiert eine maximale Temperaturdifferenz zwischen Experiment und Simulation bei $\tau = 120$ s von $\Delta t < 4$ °C. Der Temperaturmesspunkt liegt in der Blechmitte.



(a) V414: Temperatur- und Masseverlauf



(b) Gemittelte Lackzusammensetzung



(c) Konzentration Lösemittel in der Gasphase

Abbildung 5.4.: Vergleich Experiment und Simulation im Prallströmversuch

Die über die Schichtdicke gemittelte Massenkonzentration der einzelnen Komponenten am Messpunkt in der Blechmitte geht aus den Simulationsrechnungen hervor und ist in Abbildung 5.4b aufgetragen. Ausgehend von der Initialkonzentration bei τ_0 nimmt aufgrund der Verdunstung von Wasser im ersten Trocknungsabschnitt neben der relativen Polyurethan-

konzentration auch die relative Butylglykolkonzentration zu. Erst nach etwa 2 min nimmt auch die Konzentration von Butylglykol ab. Abbildung 5.4c zeigt einen Vergleich zwischen der gemessenen Butylglykolkonzentration in der Abluft und der errechneten Konzentration am Messzellenausgang. Neben der Lösemittelkonzentration ist auch die simulierte Wasserkonzentration am Messzellenausgang aufgetragen. Die bevorzugte Verdunstung von Wasser innerhalb des ersten Trocknungsabschnittes ist anhand der Lage des Konzentrationsmaximums circa 50 s vor dem Maximum von Butylglykol deutlich zu erkennen.

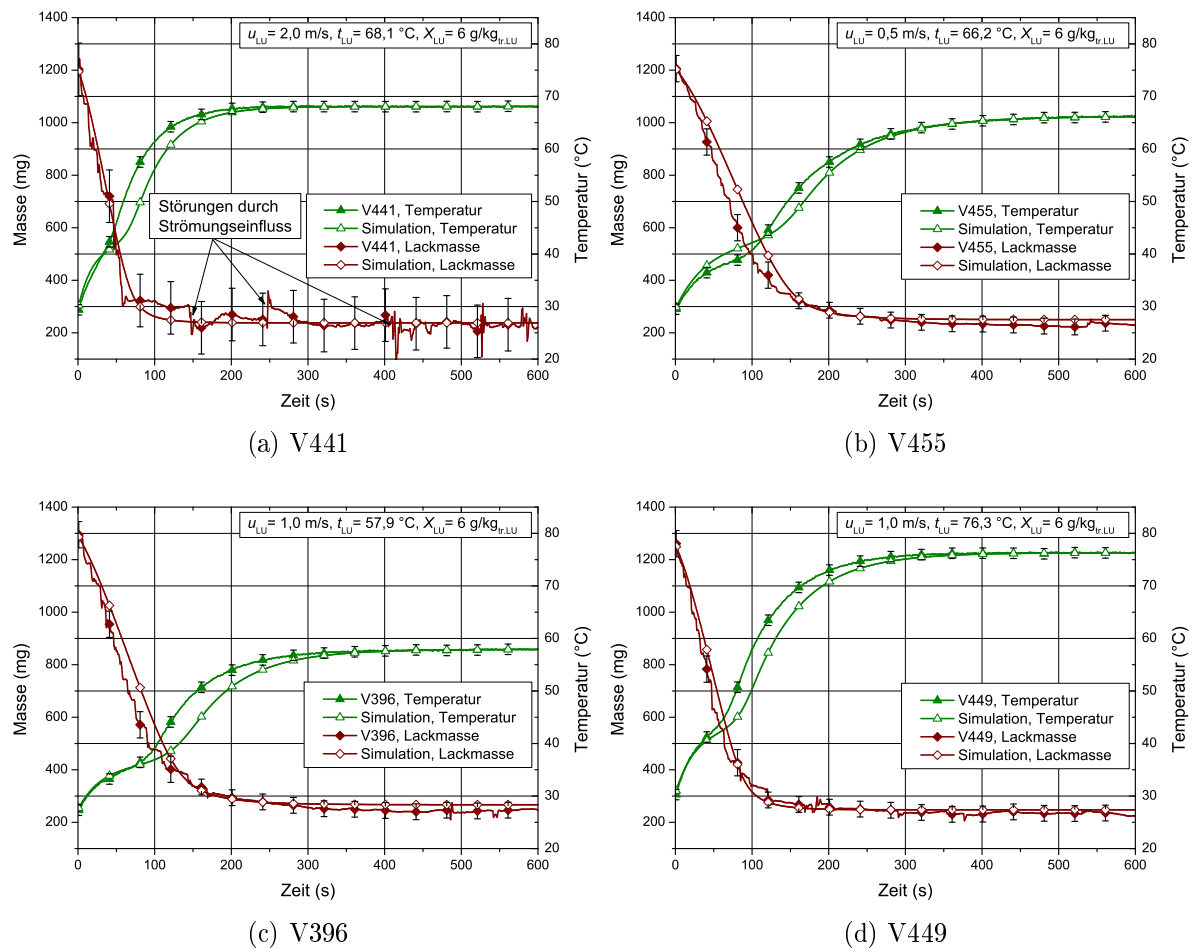
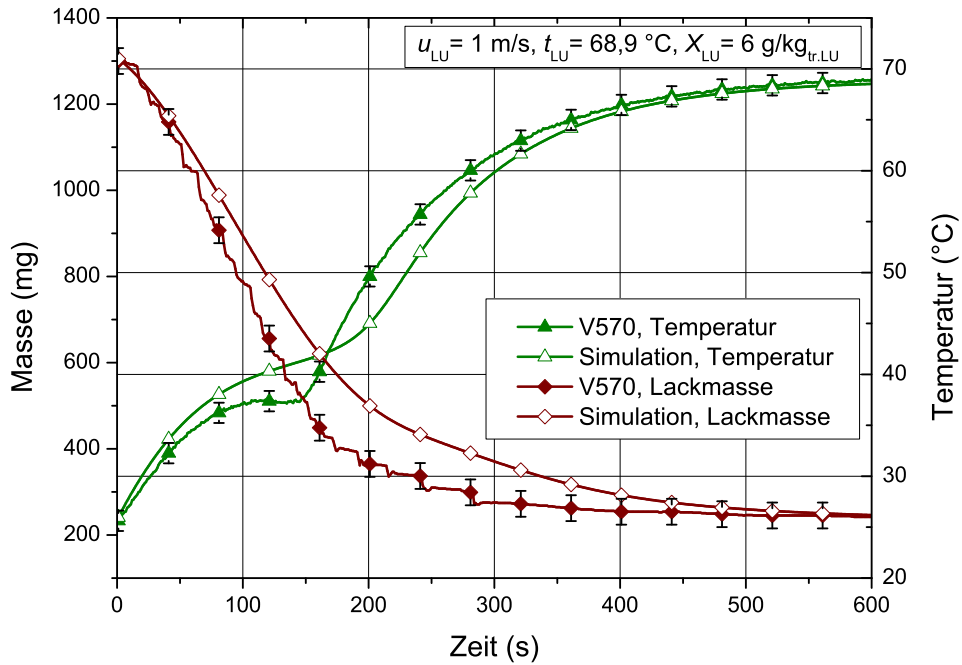


Abbildung 5.5.: Prallströmversuch - Parametervariationen

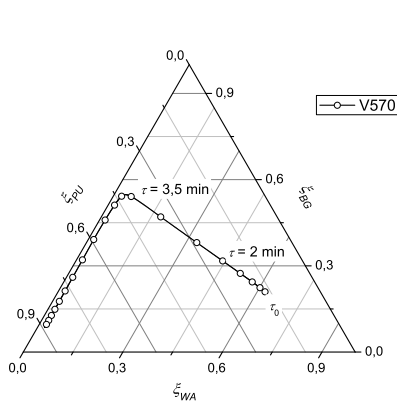
Abbildungen 5.5a - 5.5d zeigen einen Vergleich von Experiment und Simulation für Variationen der Anströmungsgeschwindigkeit und -temperatur. Auch hier werden Massenabnahme und Temperaturcharakteristik richtig wiedergegeben. Die Abweichungen fallen jedoch größer als bei Versuch V414 aus. Bei Versuch V441 in Abbildung 5.5a wird durch die Anströmungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s die Waage so stark gestört, dass die gravimetrischen Messergebnisse nur eingeschränkt aussagekräftig sind. Dies ist an den großen Fehlerbalken in Abbildung 5.5a ersichtlich.

5.2.2. Modelllack auf ebenem Blech in Parallelanströmung

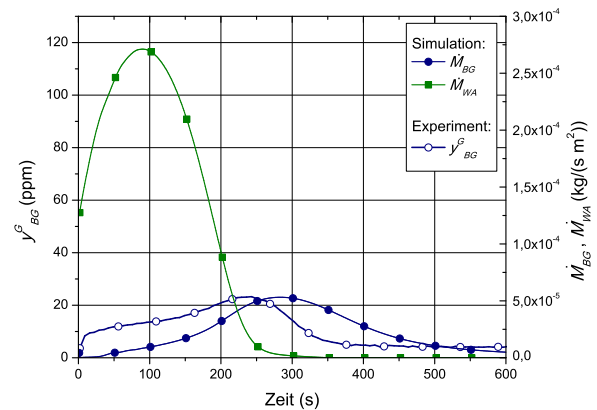
Abbildung 5.6a zeigt einen Vergleich der Temperaturzunahme und Massenabnahmecharakteristik für ein ebenes Probeblech in einer Parallelströmung bei Standardversuchsbedingungen. Temperaturzunahme und Massenabnahme werden qualitativ richtig wiedergegeben, die Abweichung zwischen Experiment und Simulation bei $\tau = 200$ s beträgt $\Delta t < 5^\circ\text{C}$ und $\Delta M < 150$ mg. Die gemittelte Lackzusammensetzung ist in Abbildung 5.6b aufgetragen. Im Vergleich zum Prallströmversuch fällt die maximale relative Butylglykolkonzentration deutlich höher aus ($X_{BG,\perp,\tau=80\text{ s}} \approx 0,3 < X_{BG,\parallel,\tau=250\text{ s}} \approx 0,55$). Die Konzentration des Lösemittels in der Gasphase weist ihr zeitliches Maximum in der Simulation später auf als in den Experimenten gemessen (Abbildung 5.6c). Dies erklärt den geringeren Massenabnahmegradienten der Simulation im Vergleich zum Experiment in Abbildung 5.6a.



(a) V570: Temperatur- und Masseverlauf



(b) Gemittelte Lackzusammensetzung



(c) Konzentration Lösemittel in der Gasphase

Abbildung 5.6.: Vergleich Experiment und Simulation im Parallelströmversuch

Für die Parallelströmversuche wurde die Anströmungstemperatur bis hin zur Raumtemperatur abgesenkt (V559: $t_{LU} = 24,9\text{ °C}$). Bei diesem Versuch liegt die Gutsbeharrungstemperatur unterhalb der Initialtemperatur (Abbildung 5.7). Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Experiment und Simulation beträgt bei Versuch V559 zwar lediglich $\Delta t < 2\text{ °C}$, jedoch wird in der Simulation erst nach $\tau = 1300\text{ s}$ die Anströmungstemperatur erreicht. Im Experiment ist dies schon nach $\tau = 1000\text{ s}$ der Fall.

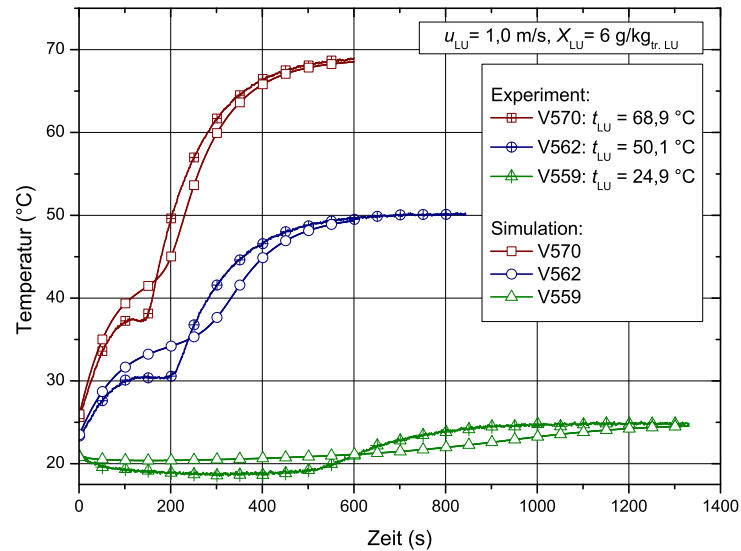


Abbildung 5.7.: Variation der Anströmtemperatur beim ebenen Blech

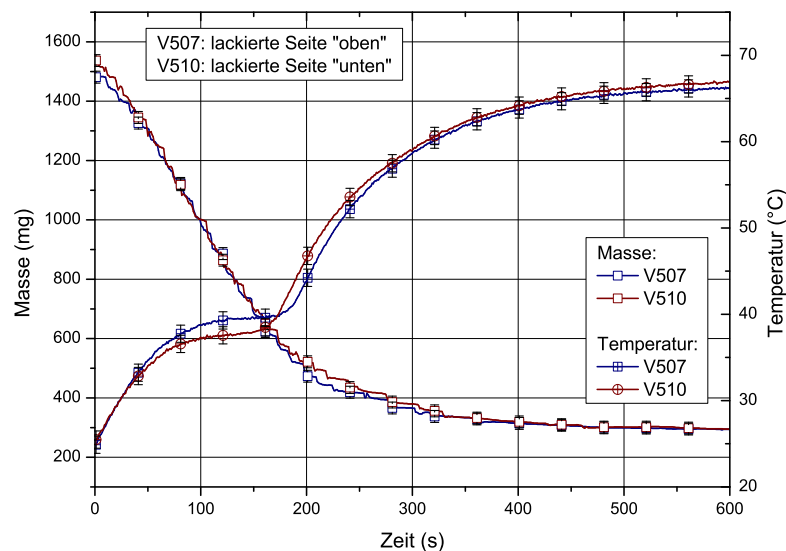


Abbildung 5.8.: Variation Applikationsseite

Darüberhinaus wurde im Parallelströmungsversuch die Orientierung der Lackschicht auf dem ebenen Probeblech variiert. Abbildung 5.8 zeigt die experimentellen Resultate der Versuche V507 (lackierte Seite „oben“) und V510 (lackierte Seite „unten“) bei Standardversuchsbedingungen. Der transiente Masseverlauf der Versuche ist im Rahmen der Messun-

5. Ergebnisse

genauigkeit deckungsgleich. Die maximalen Temperaturdifferenz beträgt $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei etwa 200 s und ist auf eine Änderung des Emissionskoeffizienten über die Trocknungsdauer zurückzuführen. Allerdings beträgt die relative Temperaturdifferenz bezogen auf den Messbereich von etwa $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ beim Standardversuch lediglich $6\text{ }\%$. *Domnick et al.* [26] messen in ihrer Versuchsanlage die Änderung der Temperatur mit dem Sichtfeld eines Pyrometers auf die lackierte Seite eines Probeblechs für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Lacksysteme. Die von *Domnick et al.* verwendete Messmethode weist somit ebenfalls eine ausreichende Genauigkeit zur Betrachtung des zeitlichen Temperaturverhaltens der Lackfilme auf und werden in [27] zum Vergleich mit Simulationsergebnissen herangezogen.

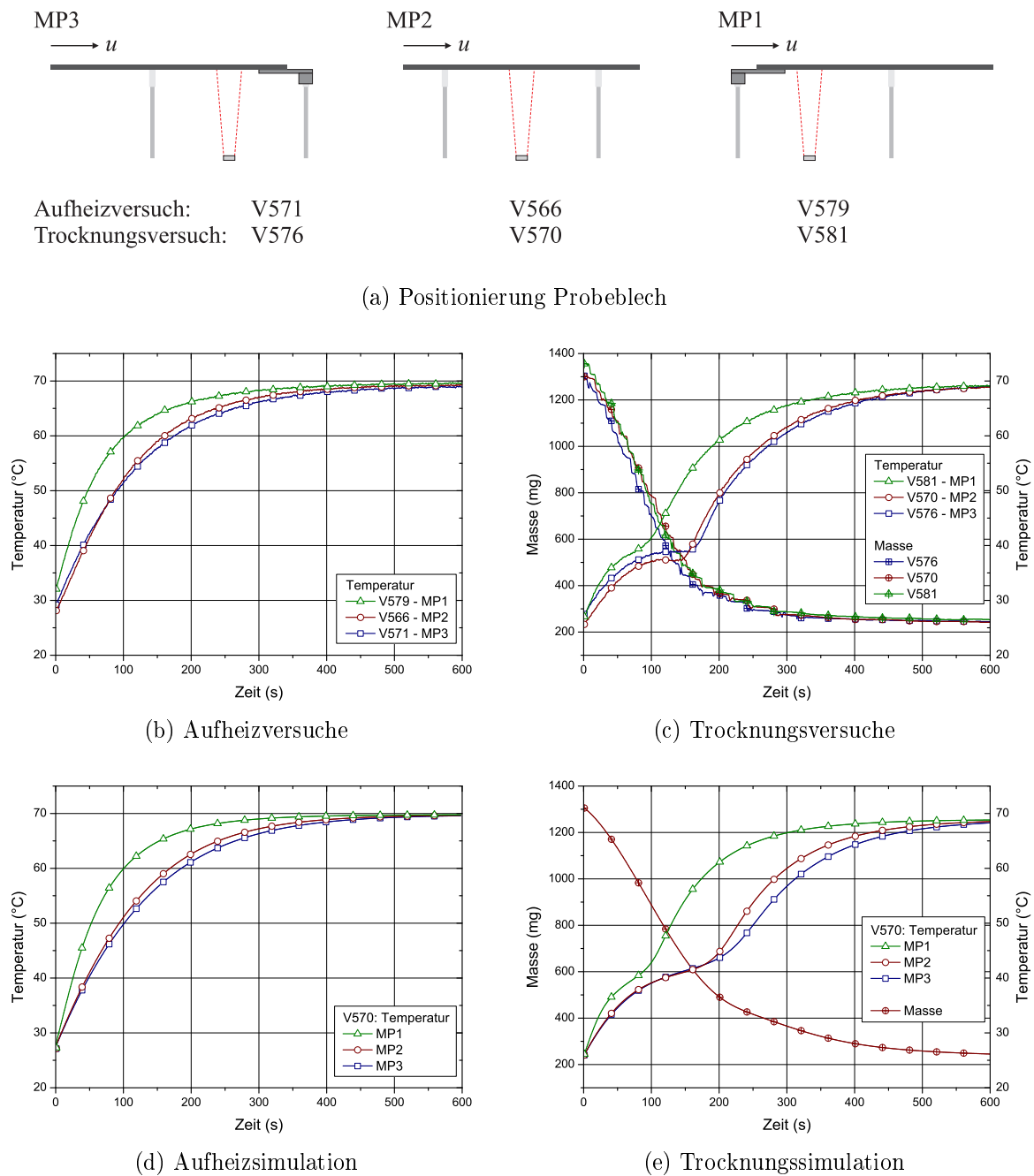


Abbildung 5.9.: Ergebnisse der Blechlagenvariation im Parallelströmversuch

Für Aufheiz- und Trocknungsversuche bei Standardversuchsbedingungen wurde experimentell die Lage des Probebleches in Strömungslängsrichtung variiert und die Ergebnisse mit entsprechenden Simulationen verglichen. Abbildung 5.9a zeigt den Messpunkt MP2 in der Blechmitte sowie zwei Lagevariationen MP1 und MP3 am Blechrand. Abbildungen 5.9b bis 5.9e zeigen die Ergebnisse auch den Versuchen und den Simulationen. Im Rahmen der schon diskutierten Abweichungen zeigen Experiment und Simulation auch für die Messpunkte MP1 und MP3 gute Übereinstimmung.

5.2.3. Modelllack auf Z-Blech in Parallelanströmung

Abbildung 5.10 zeigt den Vergleich von drei Aufheizversuchen (V295 - V297) mit der entsprechenden Simulation. Die maximale Abweichung der Aufheizversuche untereinander ist geringer als $1,5\text{ °C}$ und liegt damit innerhalb der Messtoleranz des Pyrometers. Die Temperatur des Z-Blechs ist lokal unterschiedlich. In Abbildung 5.10 ist daher neben dem Temperaturverlauf im Punkt P05 im Zentrum des Messfeldes des Pyrometers auch der Temperaturverlauf im Steg (P07) und auf der Oberseite des Bleches (P09) unmittelbar hinter der Falzkante aufgetragen. Die Punkte P07 und P09 liegen im Randbereich des Messfeldes des Pyrometers und werden ebenfalls mitgemessen. Der genaue Einfluss der einzelnen Punkte kann aufgrund von Positionierungsungenauigkeiten des Probebleches in der Messzelle nicht exakt bestimmt werden.

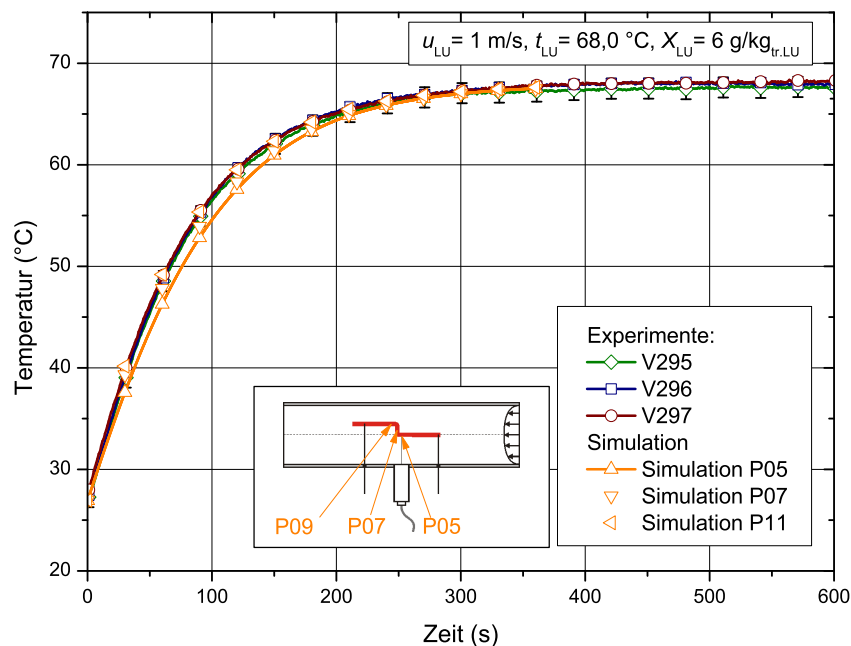


Abbildung 5.10.: Aufheizen Z-Blech, Orientierung: *forward facing step flow*

Der zeitliche Temperatur- und Masseverlauf ist in Abbildung 5.11 für ein Z-Blech in einer Parallelanströmung (Orientierung: *forward facing step flow*, Abbildung 3.1) für Experiment und Simulation bei Standardbedingungen aufgetragen. Sowohl im Temperatur- als auch im Masseverlauf zeigt sich eine deutliche Abweichung von Experiment und Simulation. In der Simulation wird mehr Zeit benötigt, um die Anströmungstemperatur bzw. das Trockengewicht zu erreichen.

Im Gegensatz zu den ebenen Probeblechen kann beim Z-Blech die Lackapplikation nur durch ein Sprühverfahren erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein pneumatischer Zerstäuber verwendet. Die Zerstäubung bewirkt eine Vortrocknung des Lacks. Auf dem Probeblech ist der Festkörpermassenanteil im Vergleich zur Ausgangszusammensetzung erhöht. Der Masseverlust zwischen Applikation und Trocknungsbeginn in der Messzelle beträgt dabei bis zu 4 %. Dieser Verlust wurde bei der Simulation der Versuche nicht berücksichtigt und erklärt die Diskrepanz zwischen Experiment und Simulation.

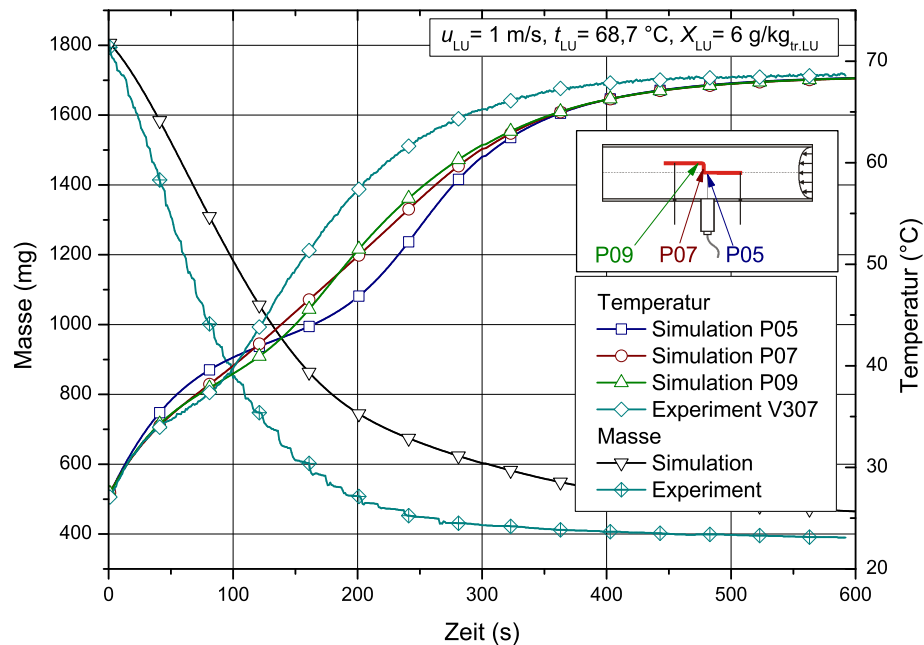


Abbildung 5.11.: Trocknung Z-Blech, Orientierung: *forward facing step flow*

Wie bei den Aufheizversuchen ist in Abbildung 5.11 auch für die Punkte P07 und P09 der Temperaturverlauf aufgetragen, da der Messbereich des Pyrometers auf dem Probeblech nicht exakt bekannt ist.

5.2.4. Industrieller Basislack

Um nachzuweisen, dass die Trocknungscharakteristika von industriell eingesetzten Lacksystemen denjenigen des Modelllacksystems gleichen, wurden unterschiedliche wasserbasierte Reallacksysteme untersucht. Abbildung 5.12 zeigt den gemessenen Temperatur- und Massenverlauf von zwei industriell eingesetzten Reallacksystemen A und B in einer Parallelströmung bei Standardbedingungen. Die zwei Trocknungsabschnitte I und II (Kapitel 1.2) sind deutlich erkennbar.

Das Reallacksystem A wurde exemplarisch in das ternäre Modelllacksystem überführt. Dazu wurde, wie in Abbildung 1.4 (Kapitel 1, Seite 5) angedeutet, der Wassermassenanteil übernommen, der Festkörpermassenanteil als Polyurethan überführt sowie die Massenanteile der organischen Lösemittel als Butylglykol zusammengefasst.

Abbildung 5.13 zeigt einen Vergleich der zeitlichen Temperatur- und Massencharakteristik von Experiment und zugehöriger Simulation im Parallelströmversuch. Die Abweichungen insbesondere im Massenverlauf erklären sich durch eine Vielzahl organischer Lösemittel, die

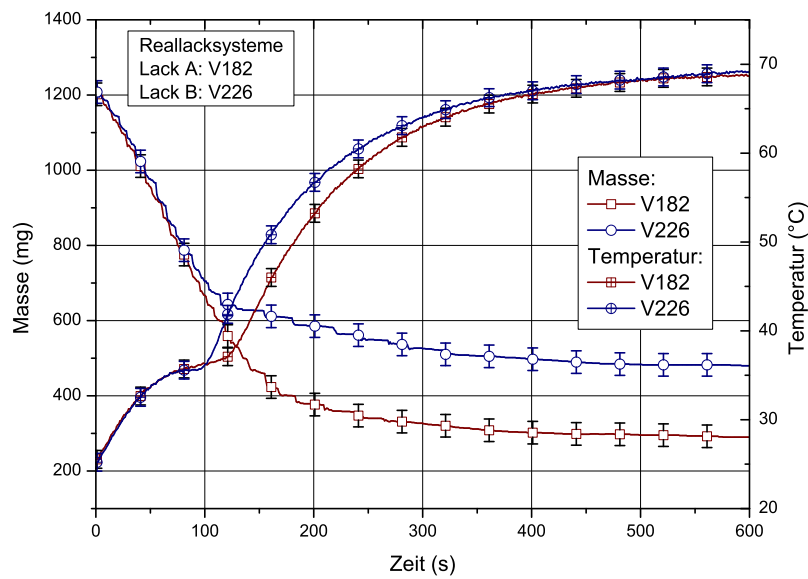


Abbildung 5.12.: Trocknung Reallacksystem A und B

in der Simulation durch das Lösemittel Butylglykol repräsentiert werden. Hier besteht, je nach Genauigkeitsanforderung an die Simulation, noch Optimierungspotential. Die Trocknungscharakteristik bezüglich der beiden Trocknungsabschnitte wird jedoch insgesamt gut wiedergegeben.

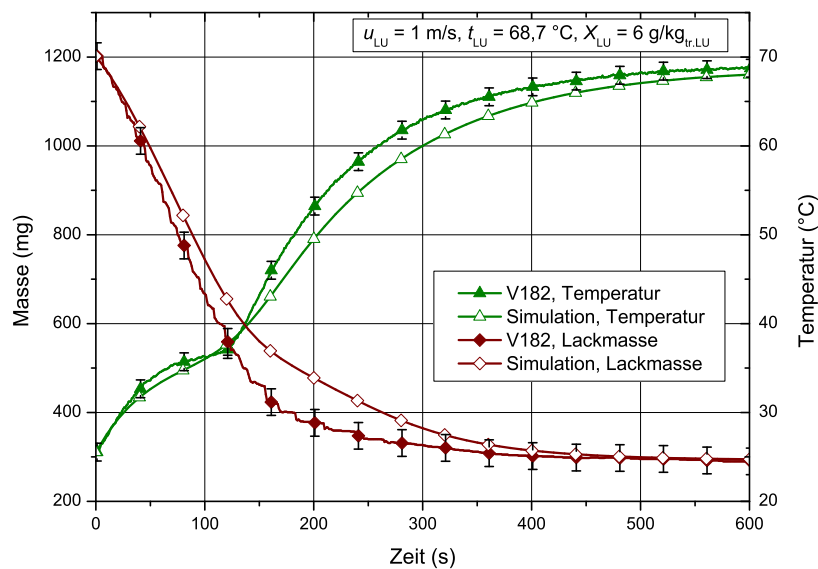


Abbildung 5.13.: Experiment Reallacksystem A und Simulation Modelllack

5.2.5. Industrieller Klarlack

In der industriellen Praxis bestehen Lackschichtaufbauten aus einer Vielzahl unterschiedlicher Schichten. Für das SiLat-Projekt ist von besonderem Interesse, ob das thermody-

namische Trocknungsverhalten der abschließenden Decklackierung von der darunterliegenden, zwischengetrockneten Basislackschicht beeinflusst wird. Zur Klärung dieses Einflusses wurde die bestehende Trocknungsanlage mit einem weiteren Trocknungskanal ausgestattet, in dem die mit Basislack applizierten Probebleche 10 min bei Standardbedingungen getrocknet wurden. Nach Entnahme der Bleche aus dem Trocknungskanal und anschließendem Abkühlen wurde eine Klarlackschicht „Klarlacksystem C“ appliziert (V283, V285). Die so getrockneten Probebleche wurden mit der Trocknung einer Klarlackschichten ohne darunterliegender Basislackschicht verglichen (V275). Tabelle 5.2 zeigt alle für die Trocknungsversuche relevanten Parameter.

Trocknung Basislack			Trocknung Klarlack			Versuchsbedingungen			
Nr.	T_0 [K]	T_2 [K]	M_0 [mg]	T_0 [K]	T_2 [K]	M_0 [mg]	u [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]	X_{LU} [$\frac{\text{g}}{\text{kg}}$]	Typ
V275	-	-	-	310,57	409,97	1162	1,0	6	
V283	298,15	343,15	1203	310,53	408,54	1262	1,0	6	, RL A
V285	298,15	343,15	1231	312,93	408,15	1253	1,0	6	, RL B

Tabelle 5.2.: Zweischichtversuche

Das Klarlacksystem C enthält nur wenig Wasser. Aufgrund der niedrigen Verdampfungsenthalpien $h_{v,i}$ der übrigen Lösemittel im Klarlacksystem C ist in Abbildung 5.14 kein ausgeprägter erster Trocknungsabschnitt bzw. Temperaturhaltepunkt ersichtlich. Ferner überlagert die endotherme Trocknung die exotherme Aushärtungsreaktion des Klarlackes deutlich. Eine Änderung des Gradienten der Aufheizkurve aufgrund einer Vernetzungsreaktion konnte nicht nachgewiesen werden.

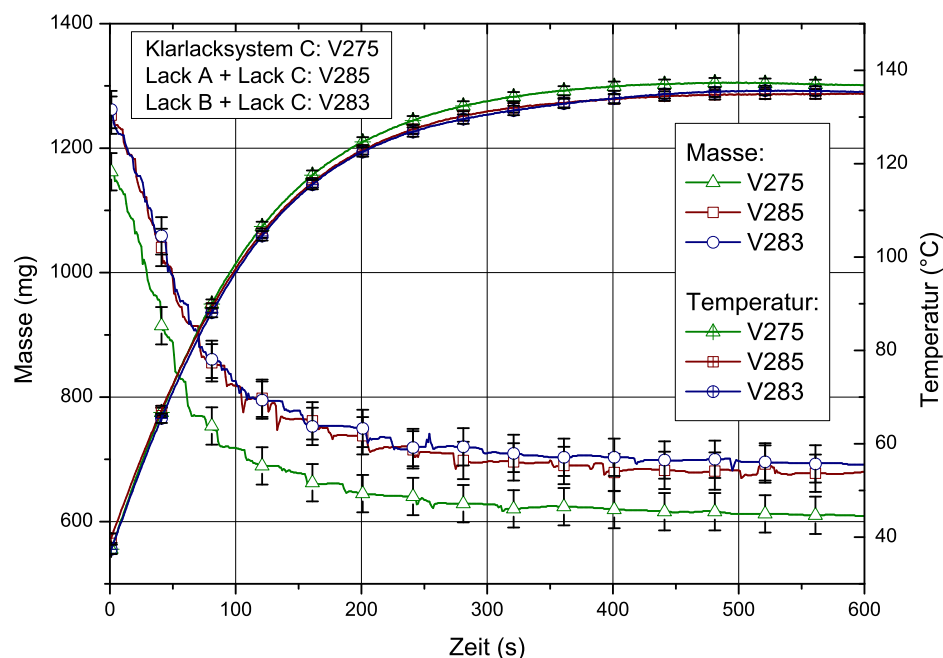


Abbildung 5.14.: Trocknungscharakteristika Klarlack

Neben den Zweischichtversuchen V285 und V283 zeigt V275 in Abbildung 5.14 das Trocknungsverhalten des Klarlackes auf einem Probeblech ohne zuvor applizierte Basislack-

schicht. Die Gradienten von Temperatur- und Massenkurven verlaufen annähernd gleich, obwohl die applizierte Masse von V275 bezüglich V285 und V283 um etwa $\Delta M_0 = 100$ mg abweicht. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Rückdiffusion von Lösemitte l aus dem Klarlack in die Basislackschicht sehr gering ist und somit den Verlauf von Temperatur- und Massencharakteristik kaum beeinflusst.

5.3. Trocknungsversuch auf profiliertem Blech

Zur Verfolgung der Oberflächenprofilierung bei Trocknung auf nicht-ebenen Untergründen wurde exemplarisch eine Probengeometrie mit rechteckförmigen Nuten unterschiedlicher Tiefe gefräst, mit Lack appliziert und anschließend bei Raumtemperatur getrocknet. Versuche bei Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur sind apparativ nur mit erhöhtem Aufwand möglich, da die verwendete Messoptik nicht den hohen Temperaturen in der Messzelle der Versuchsanlage ausgesetzt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher auf diese Versuche verzichtet.

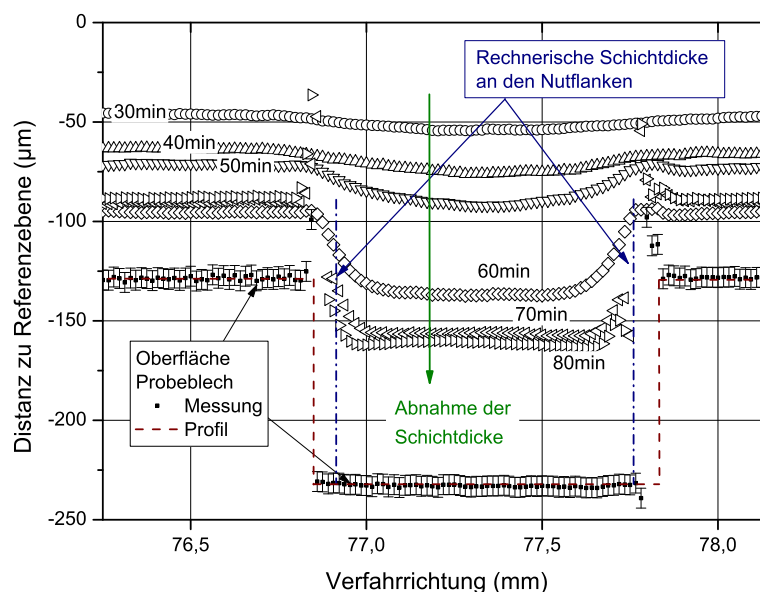


Abbildung 5.15.: Auswertung der chromatisch konfokalen Abstandsmessung

Abbildung 5.15 zeigt für eine Nut der Tiefe von $100\text{ }\mu\text{m}$ und einer Breite von 1 mm das Oberflächenprofil gemessen von einer Referenzebene zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Auswertbereich, wie in Abbildung 3.9 (Seite 30) angegeben. Die initiale Schichtdicke beträgt $270\text{ }\mu\text{m}$ in der Nut und $190\text{ }\mu\text{m}$ auf dem Steg. Der Film trocknet zunächst nahezu gleichmäßig über der Rillenstruktur. Allerdings ist ein Profilierungstrend, also ein „Einsinken“ der Lackfilmoberfläche über den Nuten, innerhalb der Messungenauigkeit erkennbar. Nach einer Trocknungszeit $\Delta\tau = 30\text{ min}$ ist das Einsinken der Lackoberfläche oberhalb der Nut deutlich erkennbar. Nach $\Delta\tau = 60\text{ min}$ ist die Trocknung der Lackschicht oberhalb des Steges nahezu abgeschlossen. In der Nut ist nach etwa $\Delta\tau = 80\text{ min}$ die Lackschicht

trocknen, nur an den unteren Kanten der Nut ist noch eine geringfügige Filmbewegung auszumachen.

Nach Abschluss der Trocknung wurde die Probe in einem Ofen bei 100 °C eingebrannt. Zur Messung der Schichtdicke musste daher die Probe immer wieder auf dem Messtisch positioniert werden. Eine Reproduzierbarkeit der Messungen ist dabei gegeben [72].

Abbildung 5.16 zeigt an drei Messpunkten der mittleren Messbahn den prozentualen Anteil der verbleibenden Schichtdicke bezogen auf die initiale Schichtdicke auf dem Steg sowie in der Fräsnut. Der Anteil der verbleibenden Schichtdicke ist in der Nut geringer als auf den Stegen, wobei die Werte innerhalb der Messungenauigkeit liegen. Das erklärt sich aus einer zusätzlichen Benetzung der Nutflanken mit Lack. Die sich durch die Höhendifferenz ergebende rechnerische Schichtdicke an den Flanken ist in Abbildung 5.15 eingetragen und ist auch im gemessenen Höhenprofil erkennbar.

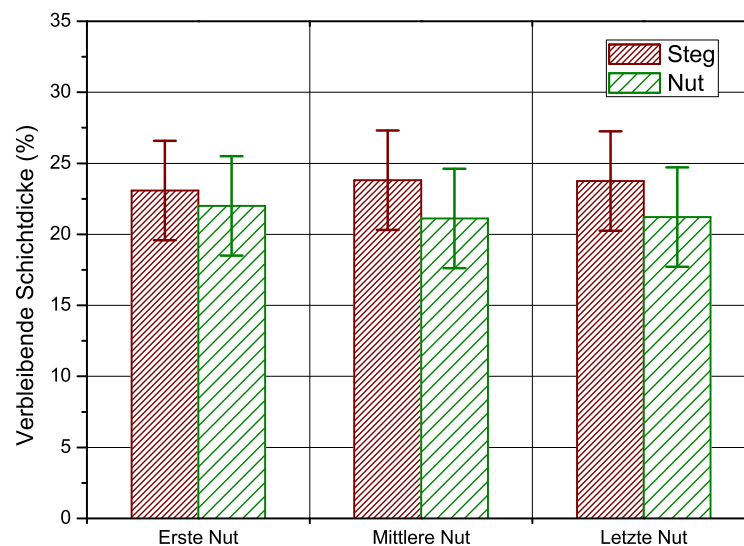


Abbildung 5.16.: Verbleibender Schichtdickenanteil auf Rillenblech

Die Versuche zeigen, dass auch bei einer starken Profilierung des Substrates und unter Berücksichtigung der Filmbildung auf den Flanken keine Einflüsse hervorgerufen durch thermische oder solutale Marangoni-Konvektion messbar sind. Negatives Gemischverhalten [102], das zu einer Materialanhäufung auf den Stegen durch Marangoni-Konvektion [34] [56]¹ führen könnte, wurde nicht beobachtet. Die Annahme des eindimensionalen Stofftransportes senkrecht zur Lackoberfläche wird somit für die im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Modellierung (Kapitel 4.3.1, Seite 38) als gerechtfertigt angesehen.

¹Im Gegensatz zu den Literaturquellen wurde die Rückseite des Substrates nicht beheizt.

5.4. Numerisches Verhalten des Trocknungsmodells

In den folgenden Kapiteln werden einige Aspekte des Trocknungsmodells und dessen Anbindung an FLUENT betrachtet. Neben Parameterstudien, die einen Eindruck bezüglich des Einflusses verschiedener Randbedingungen auf den Trocknungsvorgang vermitteln, wird der Gültigkeitsbereich und die Anwendbarkeit des Trocknungsmodells nachgewiesen.

5.4.1. Diskretisierung in der Grenzschicht

In verschiedenen Rechnungen wurde für den Fall einer Parallelanströmung die diskrete Auflösung der Grenzschicht variiert, um den Einfluss des Gitters auf den transienten Temperatur- und Massenverlauf des Trocknungsmodells abzuschätzen. Tabelle 5.3 zeigt die Parameter, mit denen die Grenzschicht des in Abbildung 5.17a dargestellten Simulationsgebietes vernetzt wurde.

z_0 [mm]	g [-]	n [-]	z_{ges} [mm]
0,001	1,4	25	3,2
0,01	1,2	35	4,9
0,1	1,2	20	3,2
0,5	1,2	12	3,7
1	1,2	9	4,3
2	1,2	4	3,5
5	1,0	5	-

Tabelle 5.3.: Unterschiedliche Grenzschichtauflösungen

Die Gesamthöhe z_{ges} der Grenzschicht berechnet sich mit der Initialhöhe z_0 , dem Wachstumsfaktor g und der Anzahl der Zellen in der Grenzschicht n nach Gleichung 4.83.

Das Probleblech wurde bei Standardbedingungen angeströmt. Es ergeben sich die für die Gitterabstände nach Tabelle 5.3 in Abbildung 5.17b aufgetragenen dimensionslosen Wandabstände. Abbildungen 5.17c und 5.17d zeigen den transienten Massen- und Temperaturverlauf für eine Aufheiz- bzw. Trocknungssimulation. Dabei ist ein Einfluss des Gitters sowohl bei einer groben Auflösung ($z_0 > 1\text{mm}$) als auch bei einer feinen Auflösung ($z_0 = 0,001\text{mm}$) des Gitters oberhalb des Bleches erkennbar. Bei einer feinen Gitterauflösung kann die Abweichung durch eine kleinere Zeitschrittweite ausgeglichen werden (Abbildung 5.17d). Die Abweichung erklärt sich durch eine hohe Courant-Zahl in der Grenzschicht. Die Courant-Zahl ist wie folgt definiert:

$$Co = \frac{u \cdot \Delta\tau}{\Delta z} \quad (5.1)$$

Für explizite Lösungsverfahren muss $Co < 1$ für eine stabile Rechnung betragen. Dabei ist u die Geschwindigkeit, $\Delta\tau$ die Zeitschrittweite und Δz die Gitterweite. Die Geschwindigkeit berechnet sich anhand des austretenden Lösemittelvolumenstroms zu $u = 0,04\text{ s}$. Zur Berechnung wird der Masenabnahmegradient aus V414 zugrundegelegt. Dieser wird durch die mittlere Dichte des austretenden Lösemittelmassenstroms sowie der lackierten Fläche dividiert. Für $\Delta z = 0,001\text{ mm}$ ergibt sich bei der Zeitschrittweite $\Delta\tau = 0\text{ s}$ die

Courant-Zahl zu $Co \gg 1$ und erklärt somit die Abweichung in Abbildung 5.17d bei hoher Wandauflösung und großer Zeitschrittweite. Da die Lösung der Transportgleichungen nicht rein explizit erfolgt, hat die Courant-Zahl allerdings nur eine bedingte Aussagekraft.

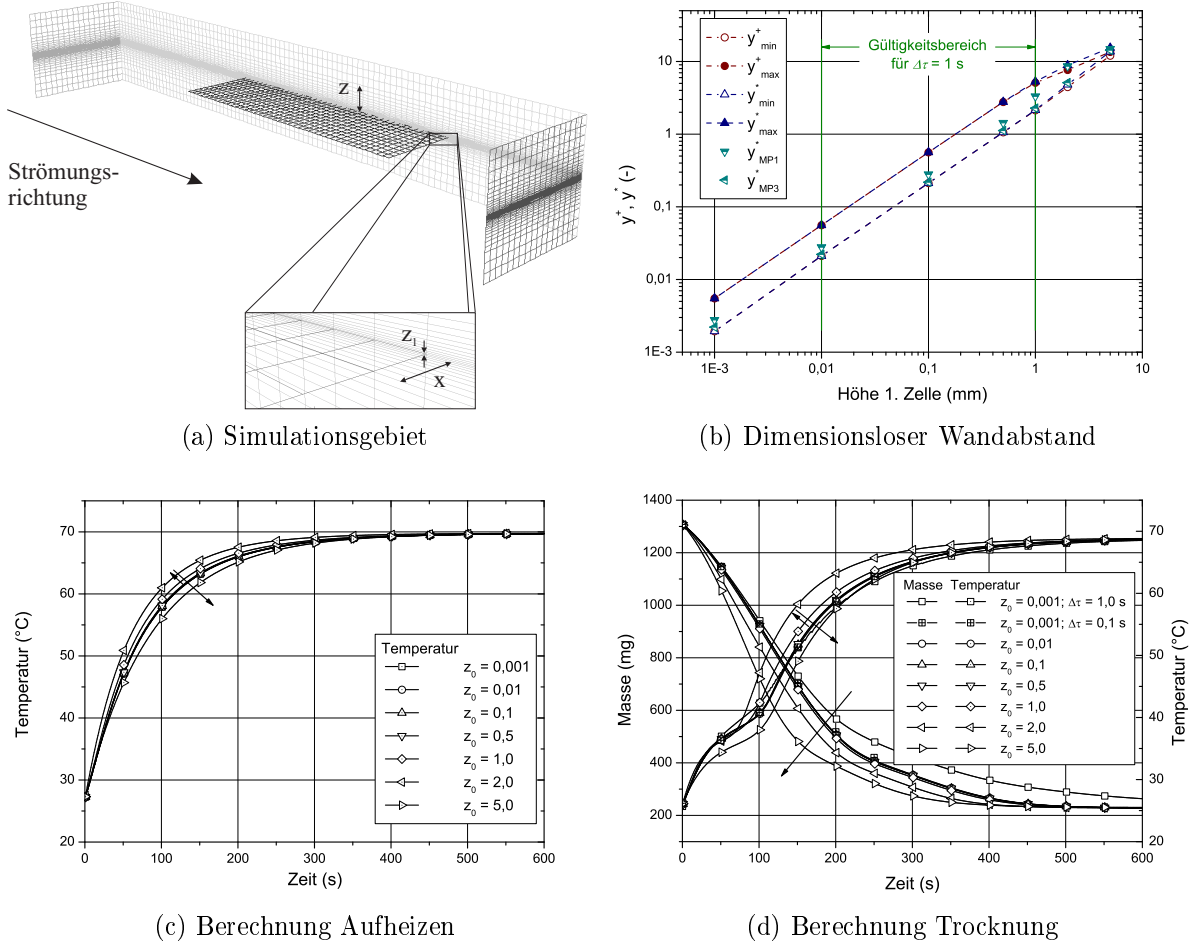


Abbildung 5.17.: Gitterkonvergenz

Die Ergebnisse der Simulationen aus Abbildung 5.17 bestätigen die Forderung von $y^+ \approx 1$ nach [4]². Für Trocknungsrechnungen für die Parallelanströmung steht sogar der Variationsbereich für $y^+ \approx y^* = 0,01 \dots 1$ bei einer Zeitschrittweite von $\Delta\tau = 1$ s zur Verfügung. In diesem Bereich beträgt die maximale Temperaturabweichung der Simulationen untereinander $|\Delta t| < 1$ °C. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Gitter haben über den Probleblechen eine Grenzschichtauflösung von $0,1 \dots 0,3$ mm (Tabelle 4.3, Kapitel 4.6.2).

5.4.2. Zeitkonvergenz

Für das in Abbildung 5.17a dargestellte Simulationsgebiet wurde die Zeitschrittweite der Rechnung für das Trocknungsmodell variiert, um den Einfluss auf das Ergebnis der Simulationen abzuschätzen. Abbildung 5.18a und 5.18b zeigen den Massen- und Temperaturverlauf einer Aufheiz- bzw. Trocknungssimulation unter Variation der Zeitschrittweite.

²FLUENT User's Guide, Kapitel 12.3.1, Enhanced Wall Treatment

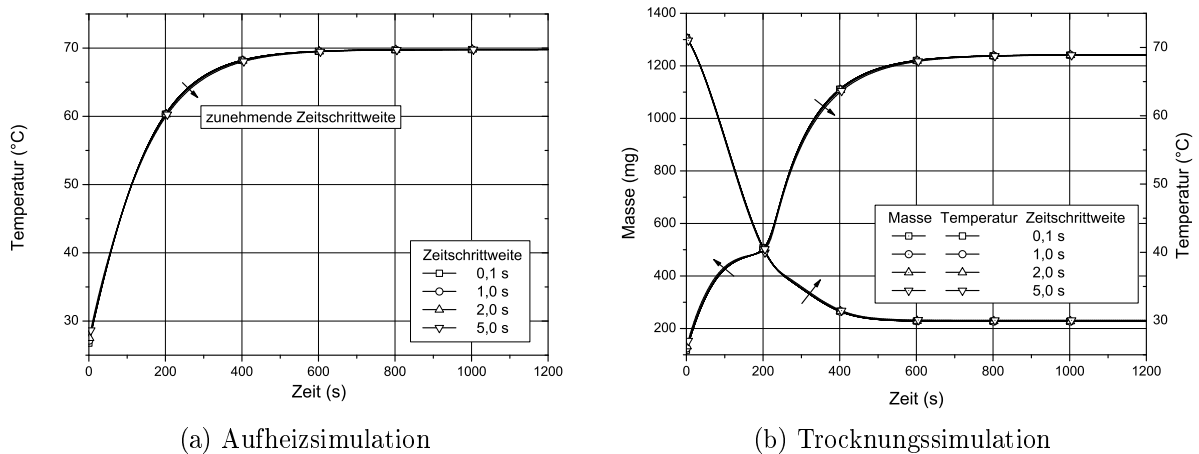


Abbildung 5.18.: Zeitkonvergenz

Die Zeitschrittweite hat nur einen geringen Einfluss auf den transienten Temperatur- und Massenverlauf der Simulationen. So ergibt sich bei der Aufheizsimulation nach einer Aufheizzeit von 400 s die Temperaturabweichung $t_{\Delta\tau=0,1\text{ s}} - t_{\Delta\tau=5\text{ s}} < 0,4\text{ °C}$. Auch bei der Trocknungssimulation beträgt die maximale Abweichung der Temperatur nach 400 s $t_{\Delta\tau=0,1\text{ s}} - t_{\Delta\tau=5\text{ s}} < 0,5\text{ °C}$. Die maximale Abweichung der Masse fällt dabei geringer als 4 mg aus. Die Zeitschrittweite kann daher vorrangig in Abhängigkeit von anderen Bedingungen, wie beispielsweise den Anforderungen bei der Verwendung von bewegten Gittern (Kapitel 6.3, Bandtrockner) gewählt werden. Bei einer kombinierten Trocknungs- und Applikationssimulation muss die Zeitschrittweite während der Applikation des Lackes stark verringert werden, wenn die Tropfenflugbahnen aufgelöst werden sollen [73]. Beim Tropfenflug vergehen zwischen Ablösen vom Zerstäuber bis zum Auftreffen auf der Oberfläche nur wenige Millisekunden. Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Trocknungssimulationen wird eine Zeitschrittweite $\Delta\tau = 1\text{ s}$ verwendet. Daraus ergibt sich eine notwendige Verringerung der Zeitschrittweite der Ordnung $O \approx 10^3$.

5.4.3. Diskretisierung im Lackfilm

Zur Optimierung des Speicherbedarfes muss die notwendige Anzahl von Kontrollvolumen im Lackfilm bekannt sein. Bei der Simulation einer einzelnen Lackschicht liegt initial eine konstante Konzentrationsverteilung vor. Nach Trocknungsbeginn bildet sich im Lackfilm ein zur Oberfläche monoton fallendes Konzentrationsprofil des Wassers (Abbildung 5.19a). Die relative Konzentration des Butylglykols nimmt zunächst aufgrund der Verdunstung des Wassers zu und fällt anschließend ebenfalls ab (Abbildung 5.19b).

Um die Konzentrationsprofile abzubilden, bedarf es einer nur geringen Anzahl von Kontrollvolumina. Abbildung 5.20 zeigt den Trocknungsverlauf eines Standardversuches bei Variation der Kontrollvolumina im Lackfilm. Auch bei einer geringen Anzahl von nur fünf Kontrollvolumina ist bezüglich des transienten Temperatur- und Massenverlaufes nur ein sehr geringer Einfluss ersichtlich.

Die Diskretisierung des Lackfilms mit einer geringen Anzahl von Kontrollvolumina ist nach *McDonald und Keddie* [62] nur bei einer niedrigen Péclet-Zahl zulässig. *McDonald und Keddie* führen dazu aufgrund von Untersuchungen von *Routh und Russel* [79] eine Péclet-

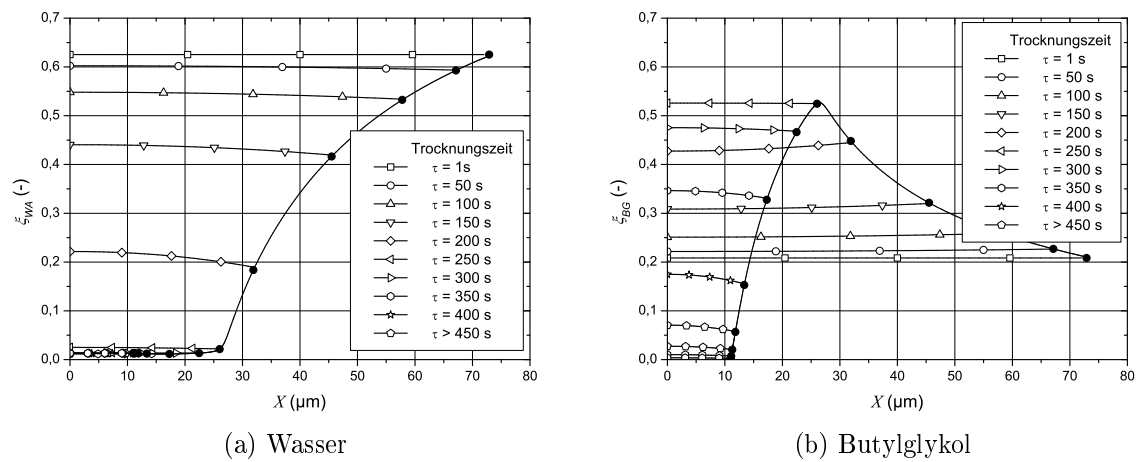


Abbildung 5.19.: Transienter Konzentrationsverlauf im Lackfilm

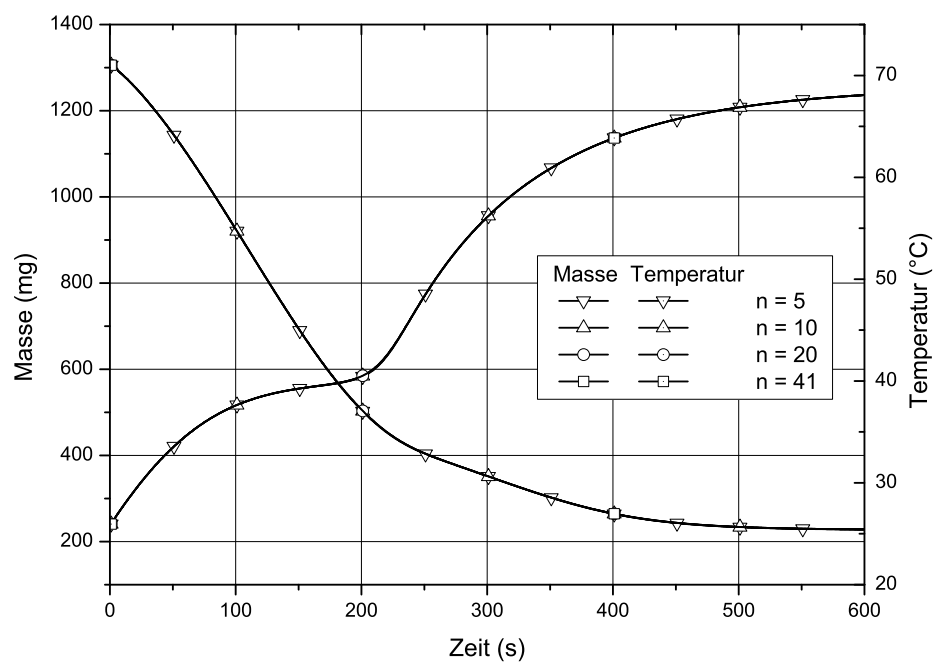


Abbildung 5.20.: Konvergenzbetrachtung - Anzahl Kontrollvolumina im Lackfilm

Zahl Pe_L für den Stofftransport im Lackfilm, analog zur Péclet-Zahl zur Beschreibung des Wärmeübergangs Pe , ein. Es gilt:

$$Pe = \frac{L \cdot u}{a} = Re \cdot Pr \quad (5.2)$$

$$Pe_L = \frac{X \cdot w}{D_0} \quad (5.3)$$

Darin ist X die Höhe des Lackfilms, w der auf die Fläche bezogene Volumenstrom, also die Austrittsgeschwindigkeit des Lösemittels aus dem Lackfilm, und D_0 der Stokes-Einstein-Diffusionskoeffizient:

$$D_0 = \frac{kT}{6\pi\eta r_h} \quad (5.4)$$

Hierbei ist k die Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur, η die dynamische Viskosität und r_h der hydrodynamische Radius der Teilchen. Ist $Pe_L \gg 1$, so dominiert die Verdunstung an der Oberfläche, und die im Film enthaltenen Partikel vernetzen sich von der Filmoberfläche ausgehend ins Innere des Lackfilms. Bei $Pe_L \ll 1$ dominieren Diffusionsvorgänge im Lackfilm. Tabelle 5.4 führt exemplarisch die Parameter für den Versuch V570 und V414 auf. Dabei wird eine Schichtdicke $X = 50 \mu\text{m}$ und ein Partikelradius von $r_h = 15 \text{ nm}$ und eine dynamische Viskosität von $\eta = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ angenommen.

Versuch	$D_0 \text{ [m}^2/\text{s]}$	$w \text{ [m/s]}$	$Pe_L \text{ [-]}$
V414	$1,43 \cdot 10^{-11}$	$6,44 \cdot 10^{-7}$	3,15
V570	$1,43 \cdot 10^{-11}$	$3,20 \cdot 10^{-7}$	1,56

Tabelle 5.4.: Péclet-Zahlen für Standardversuche

Bei den durchgeführten Versuchen kann durch die Péclet-Zahl keine eindeutige Zuordnung bezüglich des Transportmechanismus des Lösemittels erfolgen oder eine Aussage bezüglich der erforderlichen Anzahl von Kontrollvolumina abgeleitet werden.

Für die praktische Anwendung der Trocknungssimulation ist eine Erhöhung der Kontrollvolumina im Lackfilm notwendig, wenn Konzentrationssprünge genau abgebildet werden müssen. Dies ist beispielsweise bei der Rückdiffusion der Fall, wenn mehrere Schichten in einem Gitter berechnet werden (Kapitel 5.5.6).

5.4.4. Turbulenzmodelle

In FLUENT stehen verschiedene Modelle zur Berechnung turbulenter Strömungen zur Verfügung. Für die Simulation realer Trockner können allerdings nur Zweigleichungsturbulenzmodelle eingesetzt werden, um in moderaten Rechenzeiten die Trocknung zu simulieren. Damit fallen das Reynolds-Stress-Modell (7 Gleichungen), das Transition-SST-Modell (4 Gleichungen) und das Transition $k\text{-}kl\text{-}\omega$ -Modell (3 Gleichungen) sowie Detached- und Large-Eddy-Simulationen aus der Betrachtung heraus. Abbildung 5.21 zeigt die Vorhersage für das Aufheizverhalten eines Probebleches unter Standardbedingungen in einer Prallströmung. Für alle Berechnungen wurde das in Abbildung 4.5c (Kapitel 4.6.2) dargestellte Gitter verwendet.

Die Vorhersagen für das Aufheizverhalten liegen beim $k\text{-}\epsilon$ -Modell um etwa 1,5 K niedriger als beim $k\text{-}\omega$ -SST- und $k\text{-}\omega$ -Standard-Modell. Zusätzlich wurden beim $k\text{-}\omega$ -Modell die

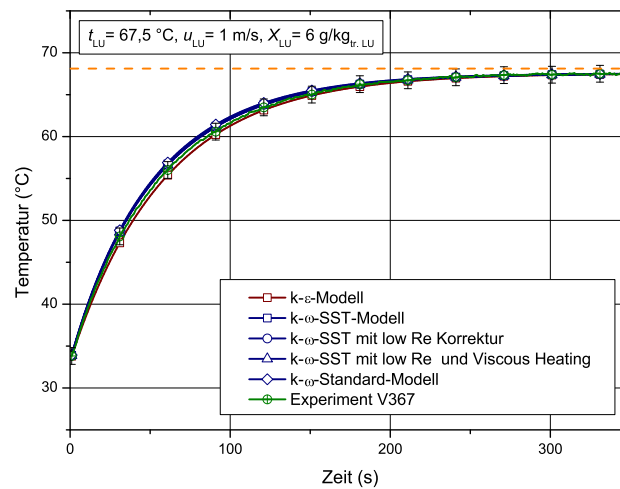


Abbildung 5.21.: Variation der Turbulenzmodelle

Modell:	$k-\epsilon$ -Modell	$k-\omega$ -SST-Modell	Messung V325	Fehler
Kraft [mN]	24,7	28,6	23,5	$\pm 0,49$ ($\hat{=}$ 50 mg)

Tabelle 5.5.: Kraft auf ebenes Probeblech in Prallströmung

Auswirkungen der Aktivierung verschiedener Optionen wie „Viscous heating“ (Wärmequelle durch Reibung in der Strömung) und „Low-Reynolds-Number Correction“ (Dämpfung der turbulenten Viskosität) auf das Aufheizverhalten betrachtet. Es zeigt sich jedoch kein signifikanter Einfluss.

Die durch die Strömung auf das Probeblech einwirkende Kraft wurde experimentell gemessen, indem die Wäageanzeige über mehrere Minuten mit und ohne Blech aufgezeichnet wurde. Die Anströmgeschwindigkeit beträgt 1 m/s. Durch eine Flächenkorrektur von Waagengestänge zu Probeblech und Abzug des Probebleches vom gemessenen Gewicht mit Probeblech wurde die auf das Probeblechen wirkende Kraft bestimmt. In der Simulation wurde die Kraft mit dem $k-\epsilon$ -Modell mit aktiviertem Enhanced Wall Treatment und dem $k-\omega$ -SST-Modell berechnet. Tabelle 5.5 führt die Ergebnisse auf. Auch hier stimmen die experimentell ermittelten Werte gut mit der Simulation unter Verwendung des $k-\epsilon$ -Modells überein.

Im Rahmen des SiLat-Projektes messen *Ye et al.* [108] das Aufheizverhalten eines ebenen Bleches in einem Düsenfeld-Prallstrahltrockner der Firma Hygrex. Die durchgeführten Experimente werden simulativ nachvollzogen. Dabei werden gute Übereinstimmungen des Aufheizverhaltens in der Simulation unter Verwendung des $k-\omega$ -Modells mit dem Enhanced Wall Treatment festgestellt. *Domnick et al.* [26] berechnen darauf aufbauend die Trocknung des Modelllacksystems Hygrex-Ofen und vergleichen diese ebenfalls erfolgreich mit durchgeführten Experimenten.

Da die Wahl des Turbulenzmodells für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Versuche nur eine untergeordnete Rolle spielt, wurde das $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell verwendet, da es für praxisrelevante Simulationsaufgaben in der Automobilindustrie oft eingesetzt wird [4].

5.4.5. Simulationsaufwand

Der zusätzliche Rechenaufwand durch das Trocknungsmodell, das am Ende jedes Zeitschrittes nach Berechnung der Wärme- und Stofftransportvorgänge in der Gasphase und im Substrat von FLUENT ausgeführt wird, ist gering. Bei den Simulationen zu den Versuchen V414 (Prallströmung) bzw. V570 (Parallelströmung) entfallen weniger als 2 % der CPU-Rechenzeit auf das Trocknungsmodell. Mehr als 98 % entfallen somit auf die Lösung der Strömungssimulation. Auf eine detaillierte Analyse der Berechnungsdauer der einzelnen Schritte bei der Trocknungssimulation (Anhang C) wird daher verzichtet.

5.4.6. Vergleich zum Vorgängermodell

Zur Evaluation des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Trocknungsmodells wurden die Ergebnisse mit dem von *Schröder* [93] und *Geipel* [36] vorgestellten Trocknungsmodell verglichen. Dieser Vergleich liegt nahe, da im Verlauf des SiLat-Projektes zunächst das Modell von *Schröder* und *Geipel* an FLUENT angebunden wurde, um die grundsätzliche Machbarkeit der Anbindung eines Trocknungsmodells an FLUENT nachzuweisen. Erst in einem zweiten Schritt wurden die in Kapitel 4.3 aufgestellten Erhaltungsgleichungen diskretisiert und implementiert. Das von *Schröder* und *Geipel* vorgeschlagene Trocknungsmodell basiert auf nachfolgender, eindimensionaler Transportgleichung in entdimensionierter Schreibweise:

$$\frac{\partial(\rho \xi_i)}{\partial \tau} - \frac{\partial(\rho \xi_i)}{\partial \eta} \frac{\eta}{X(t)} \frac{\partial X(t)}{\partial \tau} = \frac{1}{X(t)^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\rho D_i \frac{\partial \xi_i}{\partial \eta} \right) \quad (5.5)$$

Die Entdimensionierung wird dabei durch die in Kapitel 4.1 beschriebene Koordinatentransformation vorgenommen. Abbildung 5.22 zeigt das dimensionsbehaftete und entdimensionierte Koordinatensystem sowie die Stützstellen m im Lackfilm.

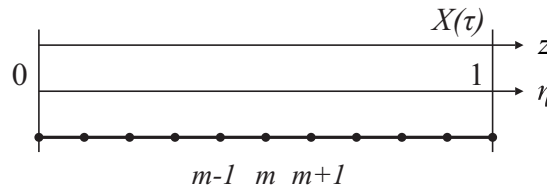


Abbildung 5.22.: Stützstellen Trocknungsmodell von *Schröder* und *Geipel*

Die Diskretisierung erfolgt mit der Finite-Differenzen-Methode (FDM). Für die Approximation der 1. Ableitung an der Stelle m erhält man:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_m \approx \frac{\Phi_{m+1}(z_m - z_{m-1})^2 - \Phi_m((z_m - z_{m-1})^2 - (z_{m+1} - z_m)^2) - \Phi_{m-1}(z_{m+1} - z_m)^2}{(z_{m+1} - z_{m-1})(z_{m+1} - z_m)(z_m - z_{m-1})} \quad (5.6)$$

Die zweite Ableitung ergibt sich zu:

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right)_m \approx 2 \cdot \frac{\Phi_{m+1}(z_m - z_{m-1}) - \Phi_m(z_{m+1} - z_{m-1}) + \Phi_{m-1}(z_{m+1} - z_m)}{(z_{m+1} - z_{m-1})(z_{m+1} - z_m)(z_m - z_{m-1})} \quad (5.7)$$

Die Gleichungen 5.7 und 5.6 können in die entdimensionierte Transportgleichung 5.5 eingesetzt werden. Unter Vorgabe derselben Stoffwerte, Randbedingungen und Initialbedingungen sowie des zeitlichen Diskretisierungsverfahrens der Transportgleichung wurde der

Parallelströmungsversuch (V570) für beide Modelle getestet. Abbildung 5.23 zeigt die Ergebnisse für den Temperatur- und Masseverlauf für die betrachteten Implementierungen. Mit „FVM“ wird das in Kapitel 4 vorgestellte Modell und mit „FDM“ das von *Schröder* und *Geipel* vorgeschlagene Modell bezeichnet.

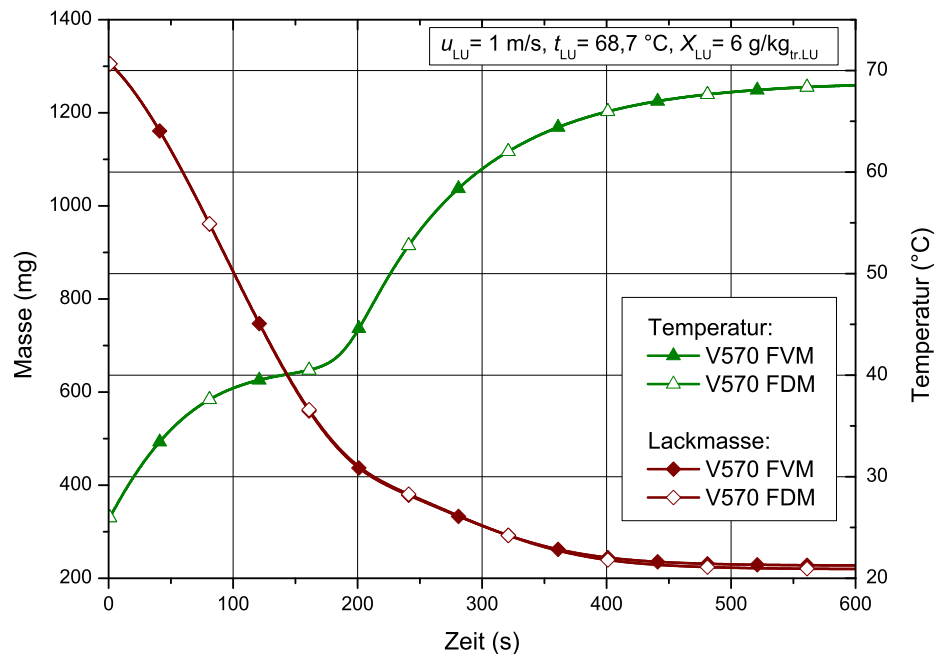


Abbildung 5.23.: Vergleich Diskretisierungsverfahren

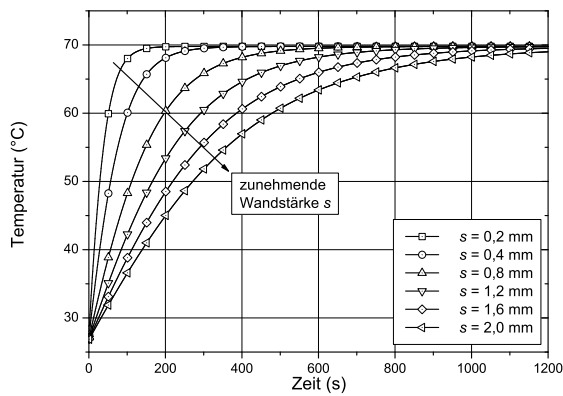
Sowohl im Temperatur- als auch im Masseverlauf zeigt sich eine nur sehr geringe Abweichung beider Implementierungen. Beide Modelle sind daher gleichermaßen für Trocknungssimulationen einsetzbar. Für kombinierte Trocknungs- und Applikationssimulationen oder Mehrschichtsimulationen ist jedoch das in dieser Arbeit vorgeschlagene FVM-Modell vorzuziehen, da es sich aufgrund der Aufstellung der Transportgleichung unter Verwendung des Gaußschen Integralsatzes massekonservativ verhält und somit die lokalen und mittleren Massenanteile bzw. Konzentrationen mit besserer Genauigkeit errechnet werden.

5.5. Simulationsergebnisse bei verschiedenen Start- und Randbedingungen

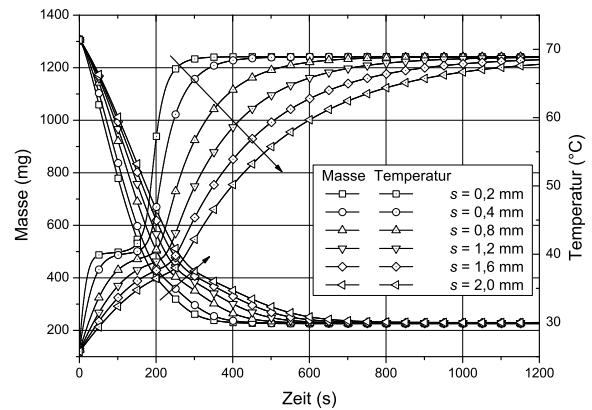
5.5.1. Einfluss des Substrates

Das Material und die Wandstärke s des Substrates und die damit verbundenen variierenden Wärmekapazitäten spielen eine wichtige Rolle bei der Charakterisierung des Aufheizverhaltens des applizierten Lacks. Abbildung 5.24a und 5.24b zeigen die Ergebnisse zur Simulation des transienten Aufheizverhaltens eines nicht-lackierten Blechs und eines lackierten Blechs unter Variation der Blechwandstärke s im Parallelanströmungsversuch. Die Randbedingungen entsprechen den Bedingungen von V565 für das Aufheizverhalten und V570 für das Trocknungsverhalten (Tabelle 5.1, Seite 63). Das Substrat besteht aus einem Stahlblech. Erwartungsgemäß verzögert sich das Aufheizen mit zunehmender Blechstärke. Bei

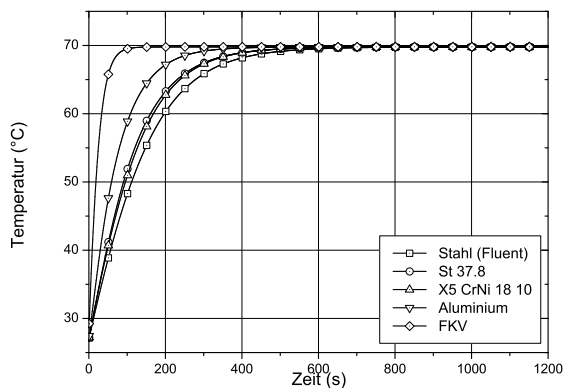
niedrigen Blechstärken ist in der Trocknungssimulation eine deutliche Ausbildung des Temperaturhaltepunktes erkennbar. Im Gegensatz hierzu wird der Temperaturhaltepunkt bei hohen Wandstärken nicht erreicht. Hier ist die Verdunstung des freien Oberflächenwassers vor Erreichen des Kühlgrenztemperaturniveaus abgeschlossen.



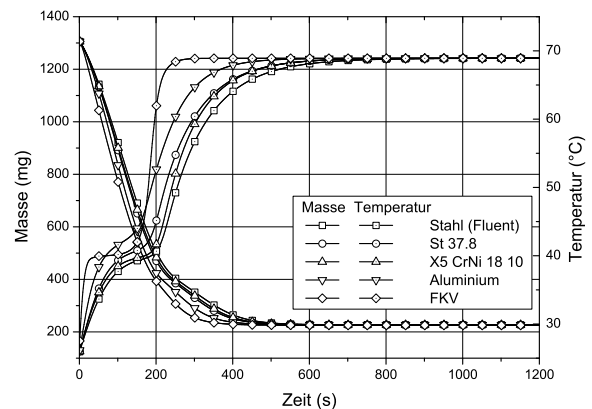
(a) Aufheizen (V565)



(b) Trocknung (V570)



(c) Aufheizen



(d) Trocknung

Abbildung 5.24.: Variation Blechstärke Stahl und Substratwerkstoff

Das zeitliche Aufheiz- und Trocknungsverhalten wurde für ein Blech aus Stahl mit der Wandstärke $s = 0,8$ mm sowie zum Vergleich für Aluminium und einen Verbundwerkstoff, bestehend aus Kohlefasern in einer Epoxyd-Matrix, berechnet (Abbildungen 5.24c und 5.24d). Tabelle 5.6 gibt die verwendeten Stoffwerte des Substrates an. Beim Emissionskoeffizienten ϵ wurde davon ausgegangen, dass die metallischen Bauteile mit KTL beschichtet sind. Derselbe Emissionskoeffizient wurde für den Verbundwerkstoff angenommen.

Für den Verbundwerkstoff müssen die mittleren Stoffwerte in Dickenrichtung berechnet werden. Dabei wird ein für Gewebe hoher Faservolumenanteil $\varphi = 0,5$ angenommen. Als Materialkennwerte werden die häufig verwendeten *High Tenacity* (HT) Fasern verwendet. Tabelle 5.7 gibt die entsprechenden Stoffdaten an. λ_{\parallel} entspricht dabei der Wärmeleitfähigkeit von Fasern parallel zur Faserachse sowie λ_{\perp} senkrecht zur Faserachse.

Zur Berechnung der mittleren Stoffwerte des Verbundwerkstoffes werden die Gleichungen 5.8 - 5.10 nach *Schürmann* [94] verwendet. Dabei bezeichnen die Subskripte f und m die

Material	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/Km]	ϵ [–]
Stahl (Fluent)	8030	502,48	16,27	0,95
St 37.8/1.0315 (VDI)	7850	435,00	57,00	0,95
X 5 CrNi 18 10 / 1.4301 (VDI)	7900	435,00	15,00	0,95
Aluminium (Fluent)	2719	871,00	202,40	0,95
Kohlefaser-Verbundwerkstoff	1500	1280,00	0,48	0,95

Tabelle 5.6.: Stoffwerte Parameterstudie Substrat

Material	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/Km]
HT-Faser	1800	710,00	$\lambda_{\parallel} = 4,9$ $\lambda_{\perp} = 1,7$
Epoxid-Harz	1200	1850	0,21

Tabelle 5.7.: Stoffwerte zum Faserverbundwerkstoff nach *Schürmann* [94]

Stoffdaten der Fasern bzw. der umgebenden Matrix sowie UD die gemittelten Werte einer unidirektionalen Schicht.

$$\rho_{UD} = \varphi \rho_f + \rho_m(1 - \varphi) \quad (5.8)$$

$$c_{UD} = c_f \psi + c_m(1 - \psi) = \frac{c_f \rho_f \varphi + c_m \rho_m(1 - \varphi)}{\rho_f \varphi + \rho_m(1 - \varphi)} \quad (5.9)$$

$$\lambda_{\perp,UD} = \frac{\lambda_{f\perp} + \lambda_m + (\lambda_{f\perp} - \lambda_m) \cdot \varphi}{\lambda_{f\perp} + \lambda_m - (\lambda_{f\perp} - \lambda_m) \cdot \varphi} \lambda_m \quad (5.10)$$

Der relative Fasermassenanteil ψ berechnet sich dabei mittels Gleichung 5.11 bei konstanter Dichte aus dem Faservolumenanteil.

$$\psi = \frac{1}{\frac{\rho_m}{\rho_f} \left(\frac{1}{\varphi} - 1 \right) + 1} \quad (5.11)$$

Aufgrund der Modellierung des Wärmetransportes im Substrat durch das Shell-Conduction-Modell (Kapitel 4.6.3, Seite 51) kann die Anisotropie der Wärmeleitung in der Substratebene nicht abgebildet werden.

Die maximale transiente Temperaturdifferenz, die beim Vergleich des Aufheizverhaltens verschiedener Stähle beobachtet wird, beträgt 6 °C. Das Aufheizverhalten beschleunigt sich deutlich bei der Verwendung von Aluminium oder dem Verbundwerkstoff. Dies kann durch die geringere spezifische Wärmekapazität im Vergleich zu den Stählen erklärt werden. Derselbe Einfluss des Substratwerkstoffes ist auch bei der Trocknung erkennbar. Hier beträgt bei den unterschiedlichen Stählen die maximale Temperaturdifferenz ebenfalls 6 °C. Beim Faserverbundwerkstoff stellt sich, ähnlich zur niedrigen Wandstärke eines Stahlbleches (Abbildung 5.24b), ein deutlich ausgeprägter Temperaturhaltepunkt ein.

5.5.2. Einfluss der Strahlung

Der Einfluss der Strahlung auf das Aufheiz- und Trocknungsverhalten wird am Beispiel eines ebenen Bleches in einer Parallelanströmung genauer betrachtet. Im Gegensatz zur Prall-

strömung können hier die numerisch berechneten Ergebnisse mit etablierten analytisch-empirischen Ähnlichkeitskennzahlen verglichen werden.

Bei erzwungener Konvektion an einer mit der Fernfeldgeschwindigkeit u_∞ längsangeströmten, ebenen Platte der Anströmlänge $L = 0,2$ m und der Breite $b = 0,11$ m gilt bei laminarer Grenzschichtströmung folgende Gleichung zur Berechnung der Nusselt-Zahl:

$$Nu_{lam} = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} = 62,30 \quad (5.12)$$

Dabei sind die Bedingungen

$$Re = \frac{u_\infty L}{\nu} = 11062 < 10^5 ; 0,6 < Pr = 0,71 < 2000 \quad (5.13)$$

in einer Luftströmung mit $u_\infty = 1$ m/s bei einer Temperatur $t_\infty = 69,79$ °C erfüllt. Die angeströmte Platte hat eine Temperatur $t_0 = 26,71$ °C, entsprechend den Bedingungen in Versuch V565 (Tabelle 5.1). Die Wärmeleitfähigkeit der Luft in diesem Temperaturbereich beträgt $\lambda = 0,278 \cdot 10^{-3}$ W/(K m). Damit kann der Wärmeübergangskoeffizient α berechnet werden:

$$\alpha = \frac{Nu_{lam} \lambda}{L} = 8,78 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5.14)$$

Daraus folgt für den analytisch bestimmten Wärmestrom:

$$\dot{Q}_a = 2 \cdot \alpha \cdot L \cdot b \cdot (t_\infty - t_0) = 16,39 \text{ W} \quad (5.15)$$

Der Faktor 2 berücksichtigt den Wärmeeintrag von der Plattenober- und -unterseite. Da die Richardson-Zahl

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = 2,02 \cdot 10^{-7} \quad (5.16)$$

deutlich kleiner als 0,1 ausfällt, kann natürliche Konvektion vernachlässigt und ein betragsmäßig gleicher Wärmeeintrag von Plattenober- und -unterseite angenommen werden.

Mit dem in Abbildung 5.17a dargestellten Gitter und den Randbedingungen aus Tabelle 5.1 wird numerisch der stationäre Wärmestrom zu $\dot{Q}_n = 17,4$ W berechnet. Die Temperatur des Bleches wird dabei konstant auf Initialtemperatur gehalten. Die Abweichung zum analytisch berechneten Wert \dot{Q}_a beträgt 6%.

Bei der Parallelströmung besteht kein Unterschied bezüglich des Wärmeübergangskoeffizienten auf der Flächen der Substratoberseite (O) und Substratunterseite (U). Das Verhältnis $\alpha_O/\alpha_U = 9,179/9,180 \approx 1$ ist nahezu ausgeglichen, wie auch schon anhand der Richardson-Zahl erwartet. In der Prallströmung beträgt der aus den numerischen Simulationen ermittelte mittlere Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 18,88$ W/(m²K). Erwartungsgemäß ist im Gegensatz zur Parallelströmung ein deutlicher Unterschied des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Substratober- und -unterseite feststellbar. Das Verhältnis beträgt in der Prallströmung $\alpha_O/\alpha_U = 22,33/15,40 = 1,45$.

In den vorangegangenen Gleichungen 5.12 - 5.15 wurde noch keine Wärmeübertragung durch Strahlung berücksichtigt. Der Sonderfall der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen zwei als graue Strahler angenommenen Körpern kann mit nachfolgender Gleichung berechnet werden.

$$\dot{Q}_{12,a} = C_{12} A_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (5.17)$$

Dabei ist C_{12} für einen konvexen Körper 1, der von einem Körper 2 konzentrisch umschlossen wird, wie folgt definiert [105]³:

$$C_{12} = \frac{C_S}{\frac{1}{\epsilon_1} - 1 + \frac{1}{F_{12}} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (5.18)$$

$C_S = 5,67 \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$ ist die Strahlungszahl eines schwarzen Körpers. Für die Emissionskoeffizienten gilt $\epsilon_1 = 0,95$ und $\epsilon_2 = 0,2$ [99]. Das Flächenverhältnis beträgt $A_1/A_2 = (0,2 \cdot 0,11)/(0,172 \cdot 0,072 + 0,475 \cdot 0,072 + 0,475 \cdot 0,172) = 0,17$ und die Einstrahlzahl $F_{12} = 1$. Der übertragene Wärmestrom ist somit $\dot{Q}_{12,a} = 8,21 \text{ W}$. Der durch Strahlung übertragene Anteil des Gesamtwärmestroms beträgt $\dot{Q}_{12,a}/(\dot{Q}_{12,a} + \dot{Q}_a) = 33 \%$ und ist somit nicht vernachlässigbar.

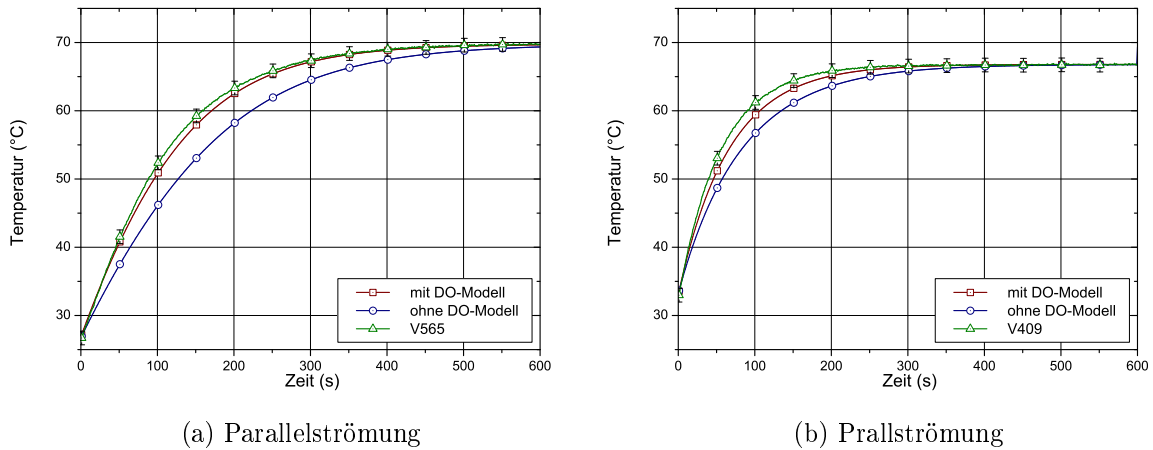


Abbildung 5.25.: Einfluss der Strahlung auf das Aufheizverhalten

Abbildung 5.25 verdeutlicht den Einfluss der Strahlung auf das Aufheizverhalten für ein ebenes Blech in Parallel- und Prallströmung. Der zeitliche Temperaturverlauf der Simulationen mit eingeschaltetem Strahlungsmodell (Seite 42, Kapitel 4.5.2) entsprechen den Versuchsergebnissen annähernd im Rahmen der Messungenauigkeit. Bei Simulationen mit deaktiviertem Strahlungsmodell erwärmt sich das Probeblech erwartungsgemäß langsamer.

5.5.3. Einfluss der Lackzusammensetzung

Der Einfluss der Lackzusammensetzung auf das Trocknungsverhalten wurde simulativ untersucht. Dabei wurde der Massenanteil zu Trocknungsbeginn $\xi_{i,\tau=0}$ von Wasser und Butylglykol für ein ebenes Probeblech bei Standardbedingungen variiert. Die initiale Schichtdicke beträgt jeweils $60 \mu\text{m}$. Abbildung 5.26a zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf für unterschiedliche Lackzusammensetzungen. Je mehr Wasser im Lackfilm enthalten ist, desto deutlicher ist auch der erste Trocknungsabschnitt mit dem Temperaturhaltepunkt ausgeprägt.

³VDI Wärmeatlas, Ka6, Strahlung technischer Oberflächen

Abbildung 5.26b zeigt den Verlauf der Konzentration an der Lackoberfläche. Deutlich ist die zuerst erfolgende Verdunstung von Wasser unabhängig von der initialen Konzentration zu erkennen.

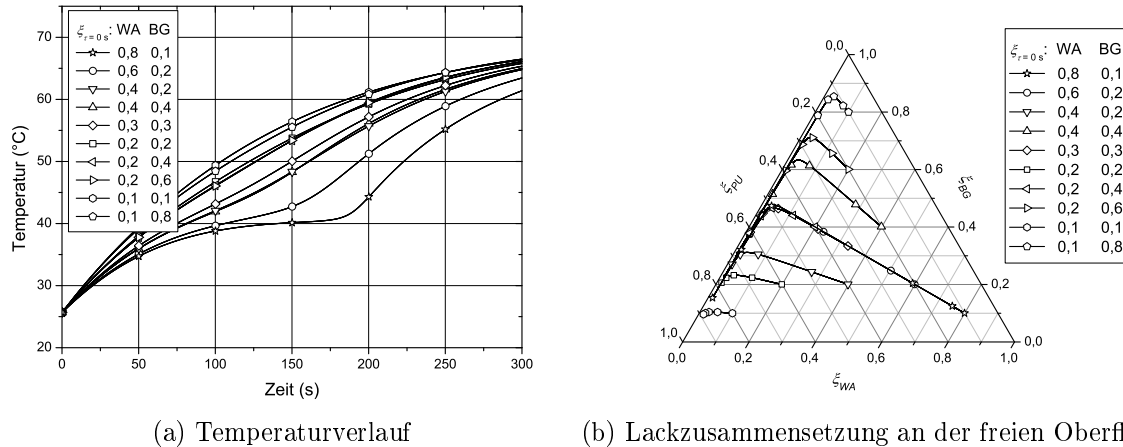


Abbildung 5.26.: Einfluss der initialen Lackzusammensetzung auf das Trocknungsverhalten

5.5.4. Einfluss der Starttemperatur

Der Einfluss der Starttemperatur t_0 auf das Trocknungsverhalten wurde mit einer numerischen Parameterstudie untersucht. Dabei wurde ein Lackfilm auf einem ebenen Probleblech unter Standardbedingungen ($t_{LU} = 70$ °C, $u_{LU} = 1$ m/s, $X_{LU} = 6$ g/kg_{tr.LU}, $X_{BG} = 0$ g/kg_{tr.LU}) in einer Parallelanströmung getrocknet. Die initiale Schichtdicke beträgt jeweils $60 \mu\text{m}$. Abbildung 5.27 zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf für unterschiedliche Starttemperaturen.

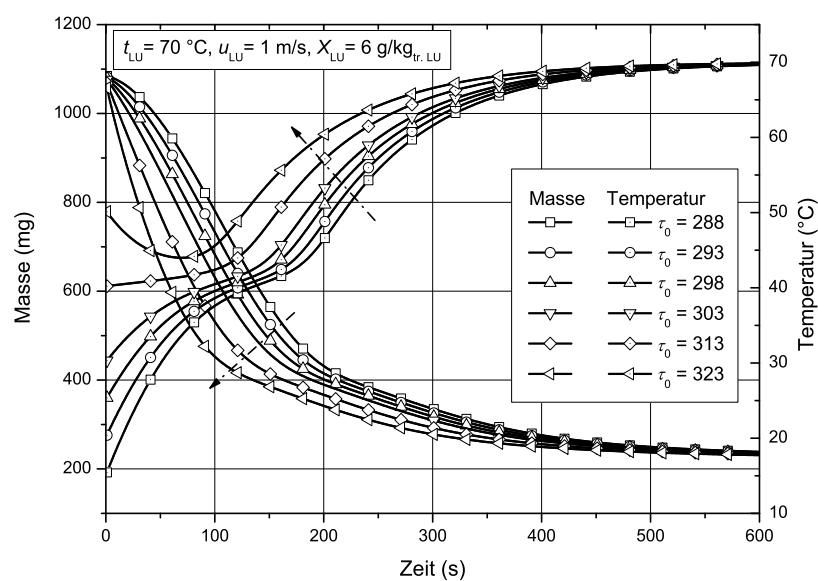


Abbildung 5.27.: Trocknungsverlauf mit unterschiedlicher Starttemperatur

Je höher die Temperatur von Blech und Lackfilm bei Trocknungsbeginn vorgegeben wird, desto schneller nimmt der Lösemittelanteil im Lackfilm ab. Bei einer Starttemperatur $t_0 = 50\text{ °C}$ liegt die Gutsbeharrungstemperatur unterhalb der Starttemperatur.

5.5.5. Zweischichtlackierung mit idealer Durchmischung

Die Nass-in-nass-Applikation spielt in der industriellen Praxis insbesondere für die farbgebenden Basislackschichten eine wichtige Rolle. Dabei werden zwei Lackschichten in kurzem Abstand nacheinander auf das Substrat ohne Zwischentrocknung bei erhöhter Temperatur aufgebracht. Dieser Prozess entspricht somit der in Kapitel 4.11 diskutierten Applikationsart.

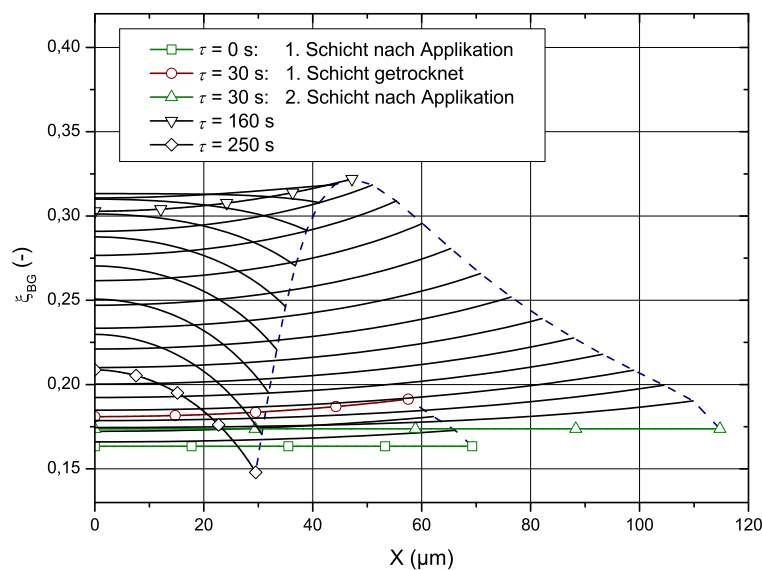


Abbildung 5.28.: Trocknungsverlauf mit Zwischenapplikation nach 30 s

Abbildung 5.28 zeigt die Simulation des zeitlichen Verlaufs der Konzentration Butylglykol in der Lacksschicht auf einem ebenen Versuchsblech bei Standardbedingungen in einer Prallströmung (V414). Nach der Applikation trocknet die Lacksschicht $\Delta\tau = 30\text{ s}$. Aufgrund der Verdunstung von Wasser und Butylglykol reduziert sich die Schichtdicke von $69\text{ }\mu\text{m}$ auf $58\text{ }\mu\text{m}$. Die vorrangige Verdunstung von Wasser führt zu einer Erhöhung des Anteils von Butylglykol im Lackfilm. Nach $\tau = 30\text{ s}$ wird eine weitere Lacksschicht appliziert. Die Zusammensetzung der applizierten Lacksschicht entspricht der Zusammensetzung der ersten Lacksschicht zu Beginn der Trocknung ($\tau = 0\text{ s}$). Unter der Annahme, dass der Lack noch nicht vernetzt ist, kann aufgrund des Impulseintrages bei einer Sprühapplikation von einer homogen durchmischten Schicht ausgegangen werden. Aufgrund der vorangegangenen Verdunstung von Wasser ist der Butylglykolanteil der Mischung jedoch erhöht. Die anschließende Trocknung entspricht der Trocknung einer einzelnen Lacksschicht.

5.5.6. Zweischichtlackierung ohne Durchmischung

Neben der in Kapitel 5.5.5 beschriebenen Nass-in-Nass-Applikation werden Lacke in der industriellen Praxis auch nach einer Zwischentrocknung appliziert. Zur Abbildung dieser Vorgänge wurde in Kapitel 4.12 (Seite 56) der Filmbildungsgrad eingeführt. Mit Hilfe des Filmbildungsgrades kann bestimmt werden, ob sich der zwischengetrocknete Lackfilm mit dem applizierten Lackfilm vermischt (Kapitel 5.5.5) oder ob die applizierte Lackschicht auf den Film „aufgesetzt“ wird.

Die Ergebnisse zur Berechnung der Trocknung eines ebenen Probeblechs bei Standardbedingungen sind in Abbildungen 5.29a-d dargestellt. Auf das ebene Probeblech in Parallelanströmung wurde bei $\tau = 0$ s ein Lackfilm mit der Schichtdicke $X = 60 \mu\text{m}$ aufgebracht. Bei einem initialen Wassermassenanteil $\xi_{WA} = 0,3$ und einem Butylglykolmassenanteil $\xi_{BG} = 0,15$ entspricht dies einer Lackmasse von knapp 1200 mg bei $t = 26,85^\circ\text{C}$. Die kritische Polyurethankonzentration zur Filmbildung wurde auf $\xi_{PU,kr} = 0,6$ festgelegt. Bei dieser Polymerkonzentration wird ein Beginn der Filmbildung erwartet. Bei einer Konzentration $\xi_{PU} \geq 0,95$ soll die Filmbildung abgeschlossen sein und es gilt somit $\varpi = 1$. Für den Diffusionskoeffizienten gilt:

$$D_{i,\varpi=0} = 10 \cdot D_{i,\varpi=1} \quad (5.19)$$

Die Änderung des Diffusionskoeffizienten wurde also mit der Größenordnung $O = 10^1$ angenommen⁴.

Abbildung 5.29a zeigt den zeitlichen Masseverlauf für das ebene Probeblech während der Trocknung. Weiterhin ist der Temperaturverlauf an den drei Messstellen entsprechend Abbildung aufgetragen. Nach $\tau = 120$ s wird eine weitere Lackschicht ($M = 1000$ mg, $X = 53 \mu\text{m}$, $t = 26,85^\circ\text{C}$, $\xi_{WA} = 0,3$, $\xi_{BG} = 0,15$) appliziert. Durch die Applikation der „neuen“ Lackschicht auf den $45 \dots 60^\circ\text{C}$ „alten“ Film kommt es aufgrund der hohen Verdunstung an der Lackoberfläche zu einem Knick im Temperaturverlauf. Während des weiteren Trocknungsverlaufes wird dann die Anströmungstemperatur erreicht $\tau = 600$ s. Die Applikation von Lack auf einen vorher nicht abgekühltes Substrat entspricht nicht der Realität. Auf die Simulation des Abkühlungsprozesse wurde in diesem Kontext zur Vereinfachung jedoch verzichtet.

Die Lackapplikation wird simulativ durch eine Änderung der Konzentrationen in den Kontrollvolumina des Filmes sowie der Massen simuliert. Abbildungen 5.29c und 5.29d zeigen die zeitliche Änderung der Konzentration von Wasser und Butylglykol im Lackfilm.

Die zeitliche Änderung des Filmbildungsgrades ist in der Blechmitte für zwei Kontrollvolumina an der freien Lackoberfläche (KV 40) und an der Substratoberfläche (KV 01) in Abbildung 5.29b aufgetragen. Vor der Applikation der zweiten Lackschicht ($\tau \leq 120$ s) wird die kritische Polyurethankonzentration $\xi_{PU,kr} = 0,6$ zunächst an der Lackoberfläche, und später über die gesamte Tiefe des Lackfilms überschritten. Nach Applikation der neuen Lackschicht ist der Filmbildungsgrad im Kontrollvolumen KV 40 an der freien Lackoberfläche wieder Null. Durch die Verdunstung und zusätzliche Diffusion von Wasser und Butylglykol in die darunterliegende „alte“ Lackschicht wird in KV 40 nach $\Delta\tau = 10$ s die kritische Konzentration $\xi_{PU,kr} = 0,6$ sehr schnell wieder unterschritten. Der Filmbildungsgrad in KV 01 ändert sich nach der Lackapplikation nicht, obgleich auch hier durch Rückdiffusion der

⁴Die hier angegebenen Werte sind Schätzungen, welche zur Parameterstudie bzw. zur Demonstrationszwecken angenommen wurden.

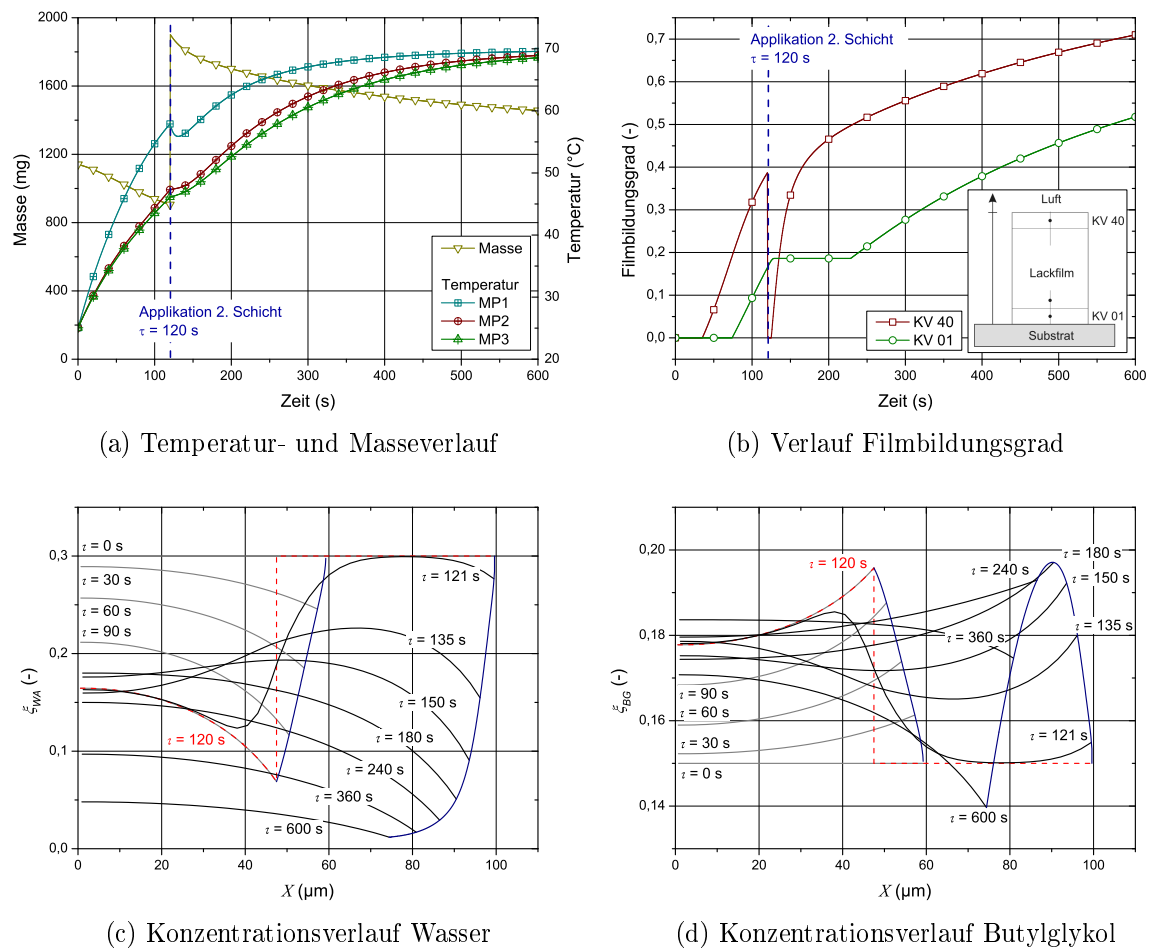


Abbildung 5.29.: Rückdiffusion und Filmbildung

Lösemittel die Konzentration von Polyurethan abnimmt. Mit voranschreitender Trocknung steigt der Filmbildungsgrad nach $\Delta\tau = 110$ s auch in KV 01 weiter an.

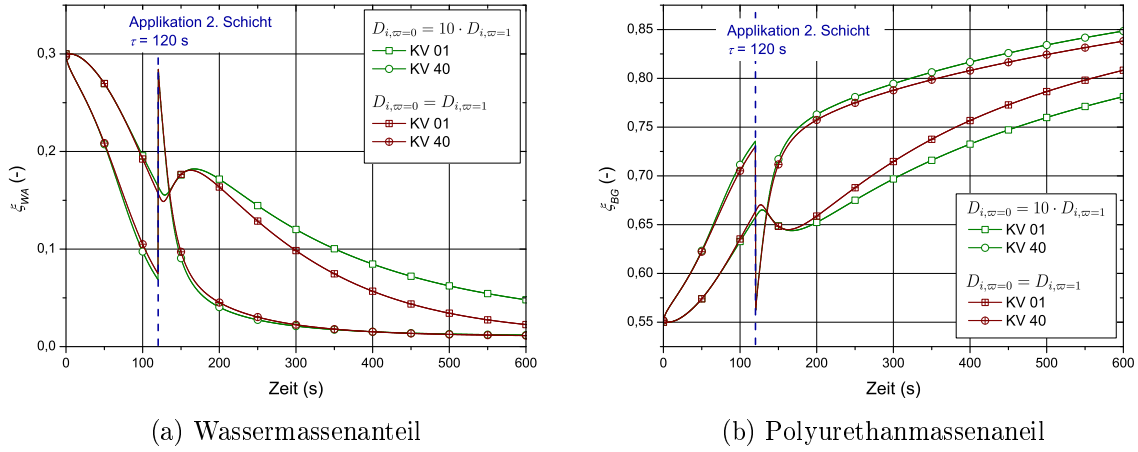


Abbildung 5.30.: Einfluss der Filmbildung

Abbildungen 5.30a-b zeigt den Einfluss des Filmbildungsgrades auf den Trocknungsprozess. In den Abbildungen wird der zeitliche Konzentrationsverlauf für oben beschriebene Simulation für KV 01 und KV 40 aufgetragen. Die Konzentrationsverläufe werden mit einer weiteren Simulation verglichen, in welcher der Filmbildungsgrad keinen Einfluss auf den Diffusionskoeffizienten hat. Es gilt:

$$D_{i,\varpi=0} = D_{i,\varpi=1} \quad (5.20)$$

Der Wassermassenanteil in Kontrollvolumen KV 01 verringert sich bei der Simulation mit Filmbildung deutlich langsamer als ohne Filmbildung. Der Massenanteil von Polyurethan liegt in KV 01 bei der Simulation mit Filmbildung unterhalb des Masseanteils bei Simulation ohne Filmbildung. Dies erklärt sich durch den verschlechterten Massentransport durch den Film an die freie Filmoberfläche. Der verschlechterte Massetransport im Film bedingt weiterhin eine etwas erhöhte Konzentration von Polyurethan an der freien Filmoberfläche. Der erhöhte Konzentrationsgradient über den Lackfilm bei der Simulation mit Filmbildung könnte die Ursache von Fehlstellen im Lackfilm erklären beziehungsweise deren Entstehung begünstigen. Jedoch bildet der nach Gleichung 5.19 modifizierte Diffusionskoeffizient keinesfalls das reale Stoffverhalten des ternären Modelllacksystems ab, da die Änderung des Diffusionskoeffizienten durch die Filmbildung in der Modellierung von *Sckuhr* [96] bereits enthalten ist.

6. Anwendungen der Trocknersimulation

Um die Anwendbarkeit der aufgestellten Modelle in der industriellen Praxis zu überprüfen, wurde das Trocknungsmodell für unterschiedliche Anwendungsszenarien eingesetzt. Bei den verwendeten Szenarien wurden, insoweit bekannt, realistische Randbedingungen vorgegeben. Weiterhin orientierte sich der Arbeitsablauf bei der Modellierung des jeweiligen Problemfalls an den Vorgehensweisen und Voraussetzungen, wie sie auch in der Industrie gegeben sind.

6.1. Trocknung einer Automobil-Karosserie

Im Rahmen des SiLat-Projektes sollte die Anwendbarkeit des Trocknungsmodells anhand der Simulation einer Karosseriedurchfahrt durch einen generischen Durchlauftrockner nachgewiesen werden [10]. Dazu wurde die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellte Implementierung des Trocknungsmodells für die Verwendung bei numerischen Gittern mit einer großen Anzahl von Kontrollvolumina parallelisiert.

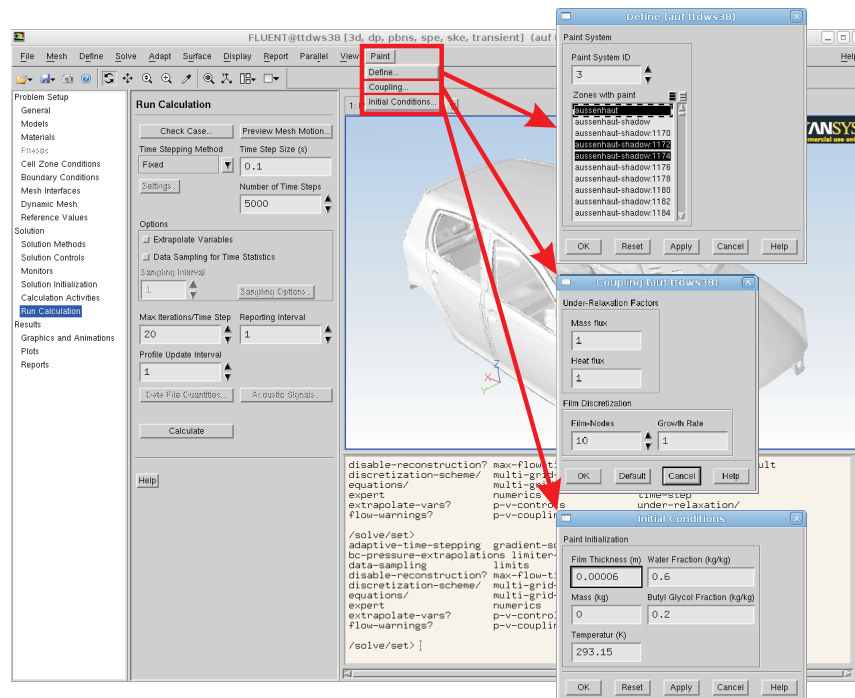


Abbildung 6.1.: Eingabemaske für das Trocknungsmodell

Zur einfachen Vorgabe und Übersicht bezüglich der Initial- und Simulationsparameter, wie beispielsweise der mit Lack applizierten Oberflächen, Schichtdicken, Lackzusammenset-

zung, Temperaturen oder Anzahl der Kontrollvolumina im Lackfilm, wurde eine graphische Benutzeroberfläche mit drei Eingabefenstern für FLUENT erstellt (Abbildung 6.1). Eine komplexe Aufgabe stellt die Generierung des Gitters im Bereich der Karosserie dar. Diese kann entweder auf der Grundlage von CAD-Daten oder bereits vorhandenen Gittern aus anderen Simulationen, z.B. Crashsimulationen, erfolgen. Die Wände der Karosserie können im Strömungsgebiet jeweils entweder als Volumen- oder Flächenmodell repräsentiert werden (Abbildung 6.2).

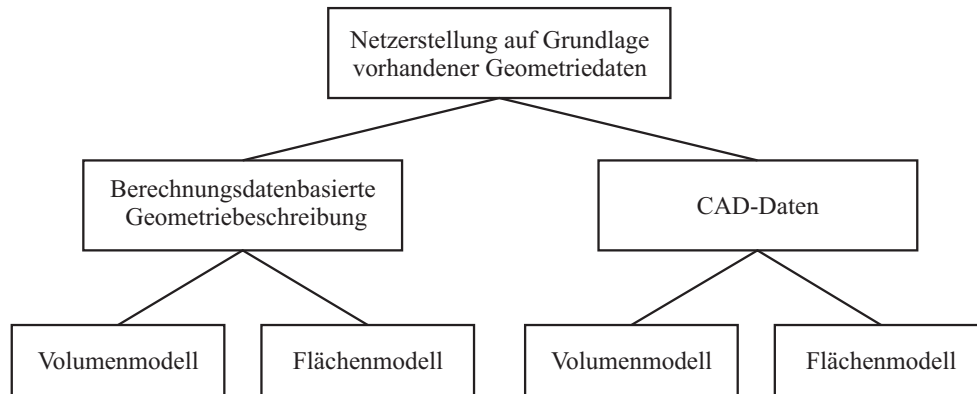


Abbildung 6.2.: Vernetzungsstrategie Karosserie nach [90]

Von Verfügbarkeit und vorgehender Aufbereitung der Daten hängt der Vernetzungsaufwand der Karosserie wesentlich ab. So kann beispielsweise das Löschen von Bohrungen und anderen, für die Trocknung nicht relevanten oder vernachlässigbaren konstruktiven Details in einem CAD-Modell weitaus einfacher sein als eine Aufbereitung vorhandener Oberflächennetze, für die eine Trocknungssimulation originär nicht vorgesehen war. Im SiLat-Verbundprojekt standen keine CAD-Karosseriedaten zur Verfügung. Daher wurde von den Projektpartnern von ANSYS Germany, ausgehend von einem Oberflächennetz aus einer Struktursimulation, eine Golf-V-Karosserie der Volkswagen AG aufbereitet und in ein Flächenmodell überführt [61]. Auf eine Auflösung der Grenzschicht mit einer Prismenschicht (Kapitel 6.2) wurde verzichtet. Abbildung 6.3a zeigt die Vernetzung des Strömungsgebietes in einer Schnittdarstellung durch die B-Säule und entlang der Symmetrieebene in Bewegungsrichtung der Karosserie.

Der generische Trockner hat eine Länge von 42m. Allerdings wurde nicht das gesamte Strömungsgebiet des Trockners vernetzt, sondern lediglich eine Box mit den Abmaßen $2,6 \text{ m} \cdot 7,0 \text{ m} \cdot 3,1 \text{ m}$ ($b \cdot l \cdot h$), in der sich die Karosserie befindet. Es wird davon ausgegangen, dass die Trocknung der vorangehenden bzw. nachfolgenden Karosserie einen vernachlässigbaren Einfluss hat. Weiterhin werden damit Strömungen durch den kompletten Trockner nicht berücksichtigt. Diese Annahme kann aufgrund einer Zonierung industriell eingesetzter Durchlauftrockner gerechtfertigt werden. An den Seitenwänden der Fahrzeugbox werden Düsengeometrien mit einer Geschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ vorbeibewegt (Abbildung 6.3b). Aufgrund einer vorgegebenen Druckdifferenz strömt über die Düsen die warme Trocknungsluft ($t_{LU} = 70 \text{ °C}$, $X_{LU} = 6 \text{ g/kg}_{\text{tr.LU}}$, $X_{BG} = 0 \text{ g/kg}_{\text{tr.LU}}$) mit einer Maximalgeschwindigkeit $u = 8,5 \text{ m/s}$ in den Trockner ein. Abbildung 6.3c zeigt die Vorbeifahrt der Düsen an der Fahrzeugbox und die damit verbundene Erwärmung von Luft und Karosserie. Die Rechnungen wurden auf einer Debian x86-64 Workstation mit acht Rechenkernen (Intel-Harpertown-Architektur, $3,16 \text{ GHz}$) mit 32 GB Arbeitsspeicher durchgeführt. Das

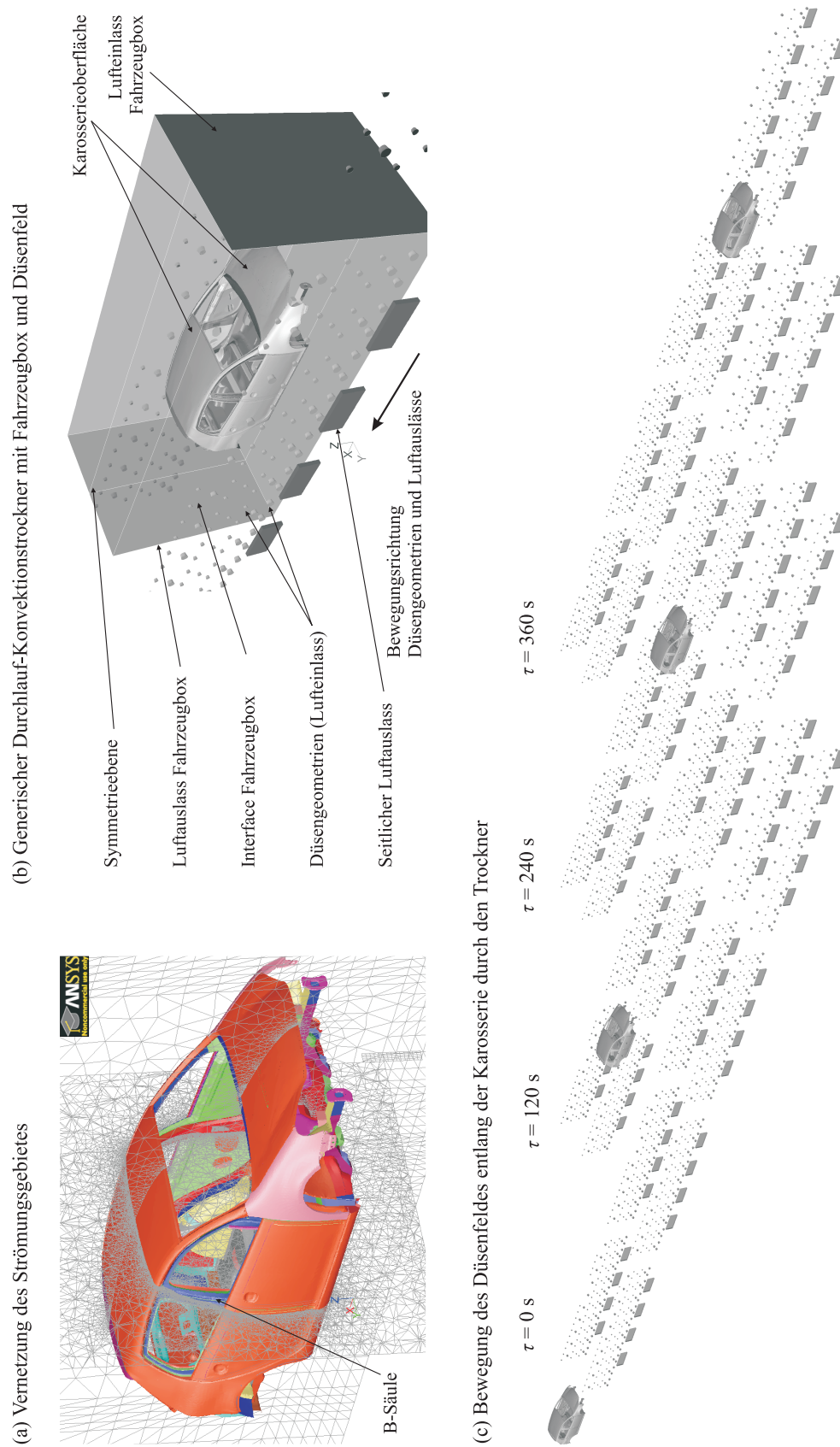


Abbildung 6.3.: Vernetzung, Modellierung und Simulationsergebnisse Golf-V-Karosserie

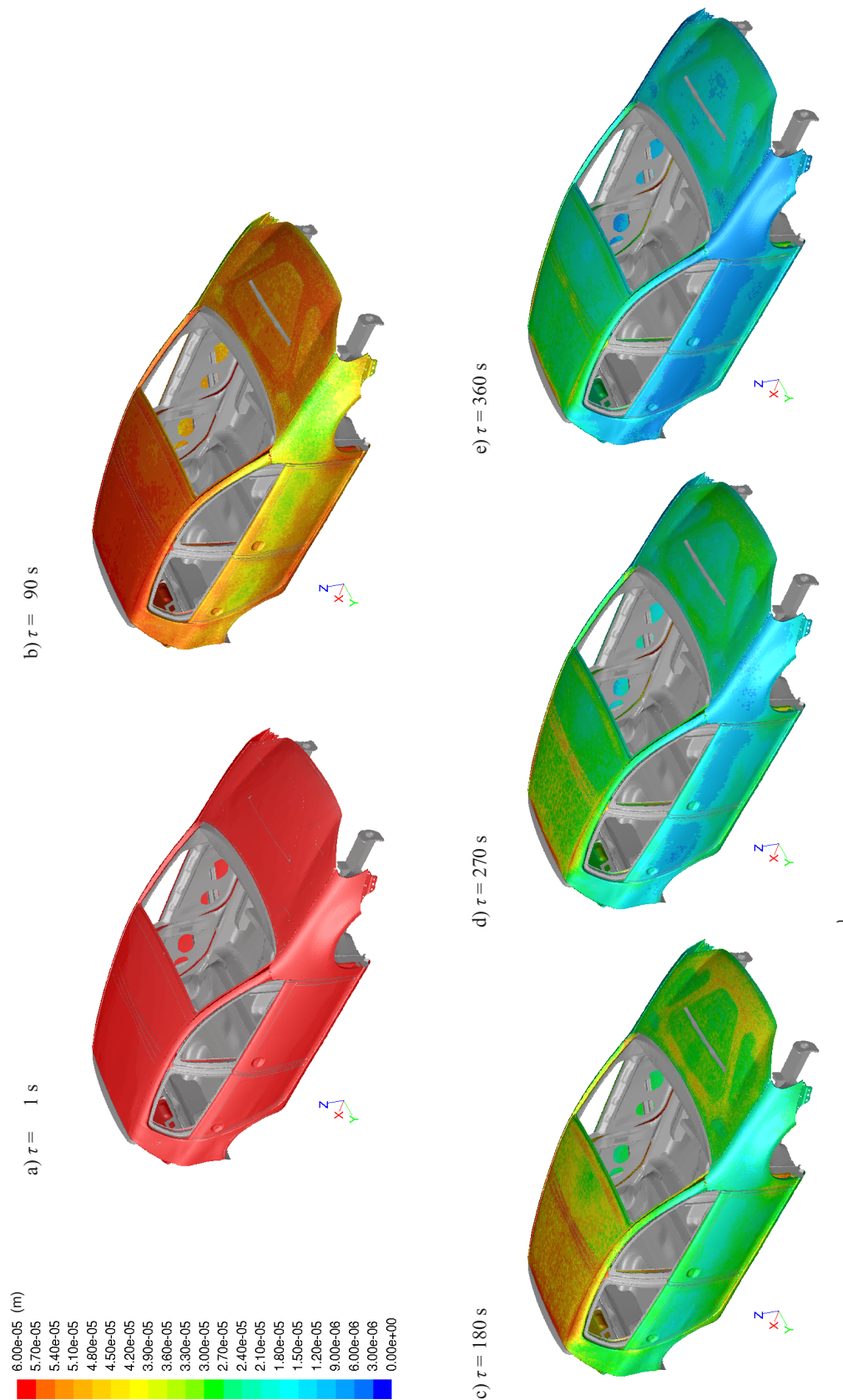


Abbildung 6.4.: Änderung der Schichtdicke auf der Karosserie über den Trocknungsverlauf

numerische Gitter hat circa 7,2 Millionen Kontrollvolumina. Für $\frac{3}{4}$ Trocknerdurchfahrt wurde eine Rechenzeit von etwa drei Wochen benötigt.

Die Abnahme der Schichtdicke ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Initial wurde auf der gesamten Karosserie eine Schichtdicke von $60\text{ }\mu\text{m}$ vorgegeben. Über die Durchfahrt der Karosserie durch den Trockner ist eine schnelle Abnahme der Schichtdicke an den Kotflügeln sowie den Türen erkennbar. Dies liegt an dem hohen Wärmeeintrag der einströmenden, lösemittelfreien Luft am unmittelbar gegenüberliegenden Düsenfeld. Auf der Motorhaube ist der Einfluss von Versteifungen auf die Trocknung deutlich erkennbar. In Bereichen mit Materialanhäufungen durch die darunterliegende Stützstruktur verläuft die Trocknung verlangsamt. Die Trocknung auf dem Dach verläuft im Vergleich zu den Türen ebenfalls verlangsamt, insbesondere wiederum in Regionen mit Materialanhäufungen. Im Gegensatz zur industriellen Praxis wurde in der Simulation kein Düsenfeld an der Decke des Durchlauftrockners vorgesehen, was die langsame Trocknung auf dem Dach im Vergleich zu den Erfahrungen aus realen Durchlauftrocknern bedingt.

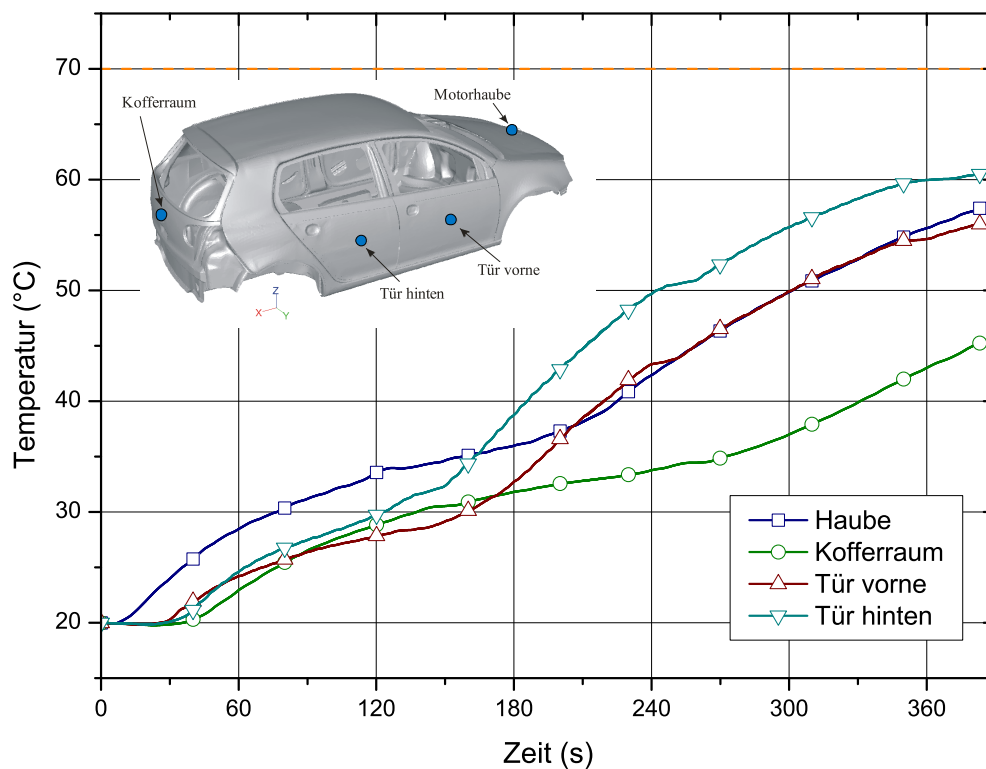


Abbildung 6.5.: Simulierter Trocknungsverlauf Golf-V-Karosserie

Der zeitliche Verlauf der Temperatur an vier Messpunkten am Karosserieblech ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Bei allen Temperaturkurven ist die Ausbildung einer Gutsbeharrungstemperatur deutlich erkennbar. Gutsbeharrungstemperatur und Beginn des zweiten Trocknungsabschnittes hängen dabei von den jeweiligen Strömungsbedingungen ab. Nach $\tau = 10 \dots 30\text{ s}$ steigt die Temperatur aufgrund der beginnenden Vorbeifahrt des ersten Düsenfeldes an. Erwartungsgemäß ist die Temperatur an der Motorhaube nach Eintritt der Karosserie in der Trockner am größten ($\tau = 60\text{ s}$), bedingt durch die zeitlich längere, direkte Anströmung aus den Düsengeometrien. Im weiteren Verlauf der Trocknung nimmt auch die Temperatur an den Türen schnell zu. Dies ist durch den geringen Abstand zu den

Düsengeometrien erklärbar. Im Gegensatz zum freien Luftraum hinter dem Außenblech an der hinteren Tür befindet sich hinter dem Außenblech der vorderen Tür ein Querträger. Daraus erklärt sich die hohe Temperatur an der hinteren Tür für $\tau > 180$ s. Nach $\tau = 130$ s, $\tau = 250$ s und $\tau = 370$ s sind Unstetigkeiten im Temperaturverlauf erkennbar. Diese resultieren aus den düsenfreien Abschnitten zwischen den einzelnen Düsenfeldern.

6.1.1. Aufheizverhalten an Profilverzweigungen

Eine besondere Anforderung an das Shell-Conduction Modell (Kapitel 4.6.3, Seite 51) ist die Berechnung des Aufheizverhaltens an Profilverzweigungen, wie beispielsweise den „T-Stößen“. Abbildung 6.6a und 6.6b zeigen das numerische Gitter eines T-Stoßes für die Simulation im Shell-Conduction-Modell und als Solid-Modell. Die T-Stöße werden stirnseitig mit einer mittleren Geschwindigkeit von $\bar{u}_{LU} = 1 \text{ m/s}$ angeströmt und erwärmen sich von der initialen Temperatur von 20 °C auf die Temperatur der anströmenden Luft ($t_{LU} = 70 \text{ °C}$). Abbildung 6.6c zeigt das Aufheizverhalten des Messpunktes MP1 in beiden Modellierungen an der Stirnseite des T-Stoßes („Inner Wall Temperature“). In Abbildung 6.6d ist die mittlere Temperatur („Static Temperature“) über den T-Stoß transient aufgetragen. Zwischen beiden Modellierungen ist keine Abweichung bezüglich der Temperatur festzustellen.

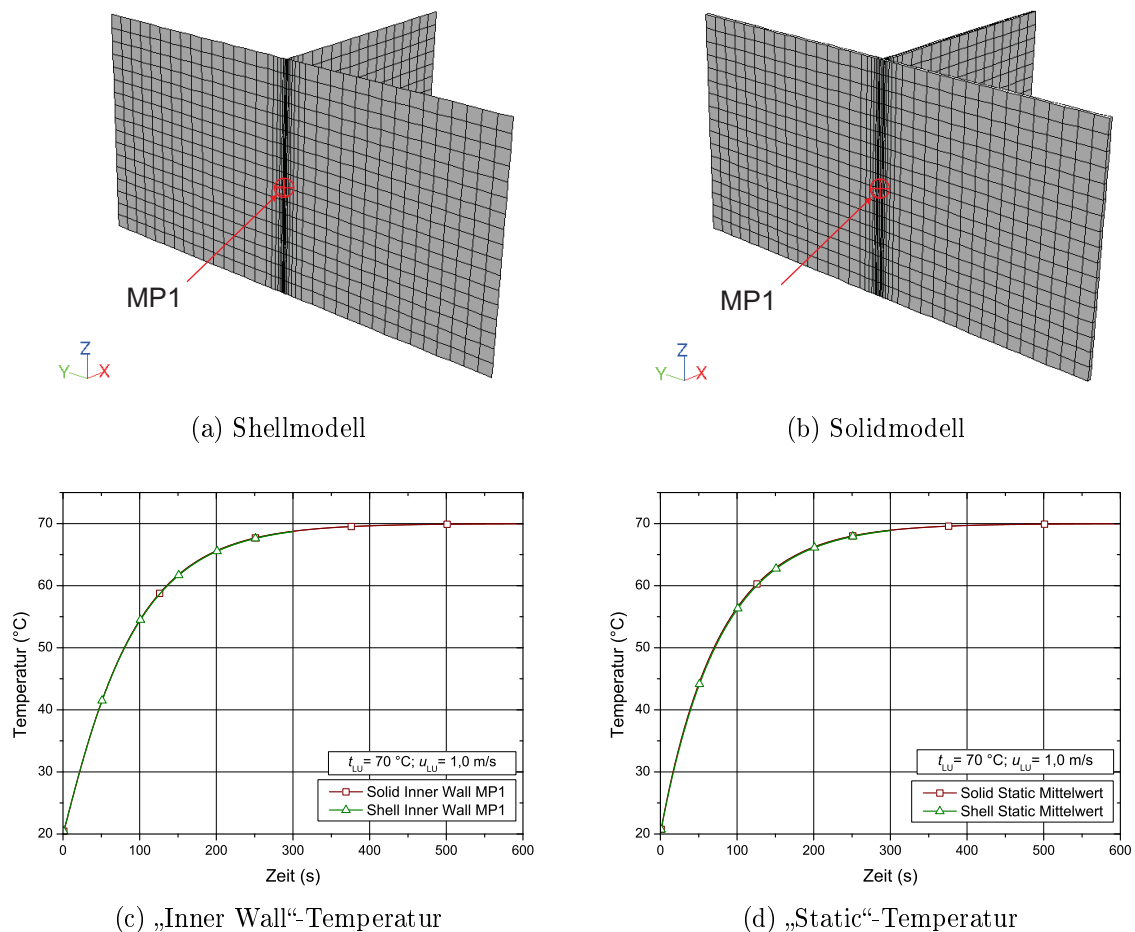


Abbildung 6.6.: Aufheizverhalten an Profilverzweigungen

Damit wurde die von *Blanke* [8] identifizierte, fehlerhafte Implementierung bei der Berechnung des Aufheizverhaltens an Profilverzweigungen durch die Verwendung des Shell-Conduction-Modells erfolgreich von ANSYS-FLUENT behoben. Eine Modellierung der Karrosserie mit dem Shell-Conduction-Modell ist somit zulässig.

6.1.2. Aufheizverhalten an Falzen und Verklebungen

Klebeverbindungen spielen im Karosseriebau neben den schon lange bewährten Falzverbindungen eine zunehmend wichtige Rolle. Wird eine Vernetzungsstrategie unter Verwendung von CAD-Daten (Abbildung 6.2) angestrebt, muss das thermische Verhalten der Fügeverbindungen korrekt abgebildet werden. Im Gegensatz zu einer stoffschlüssigen Verbindung müssen gegebenenfalls der Kontaktwiderstand bei einer Falzverbindung bzw. die thermodynamischen Eigenschaften einer Klebnaht berücksichtigt werden. Zur Abschätzung wurde eine in Abbildung 6.7 dargestellte Falzgeometrie vernetzt, mit einer Prallströmung ($\bar{u}_{LU} = 1 \text{ m/s}$, $t_{LU} = 70 \text{ °C}$, $t_{Falz, \tau=0} = 20 \text{ °C}$) beaufschlagt und das zeitliche Aufheizverhalten aufgezeichnet.

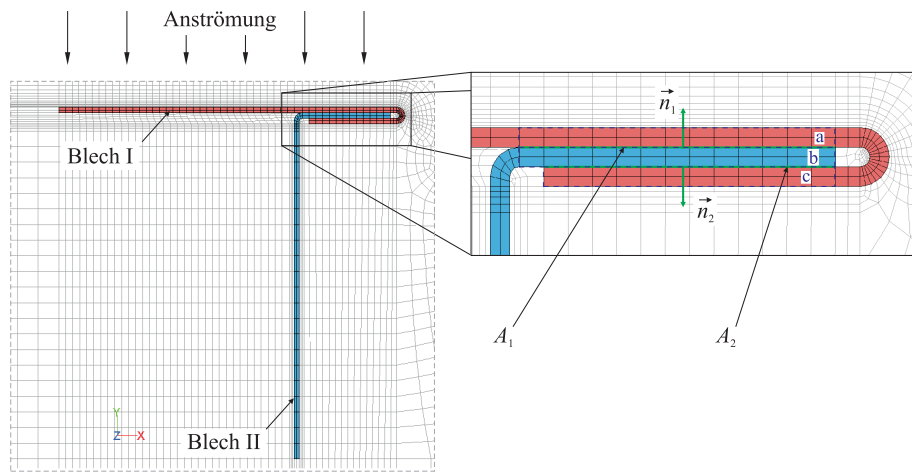
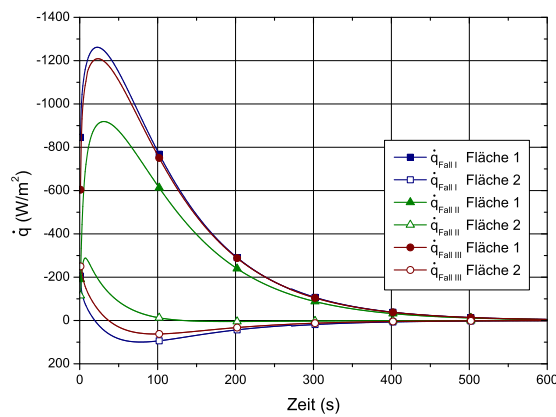


Abbildung 6.7.: Berechnungsgebiet Falzverbindung

Bei der Simulation werden drei Fälle unterschieden:

- I. *Stoffschlüssige Verbindung durch Schweißen:*
An den Flächen A_1 und A_2 gilt für den Kontaktwiderstand $R_{Kt} = 0 \text{ K/W}$.
- II. *Reibkraftschlüssige Verbindung:*
An den Flächen ist der Kontaktwiderstand $R_{Kt} \neq 0$. Dies wird thermodynamisch durch eine dünne Luftschicht ($h_{LU} = 50 \text{ }\mu\text{m}$) mittels des Shell-Conduction Modells repräsentiert. Die Luftschicht verursacht den für einen Kontaktwiderstand typischen Temperatursprung an den Flächen A_1 und A_2 . Für die Fläche A_1 ist $R_{Kt, A_1} = 2,994 \text{ K/W}$, für A_2 ist $R_{Kt, A_2} = 3,244 \text{ K/W}$.
- III. *Stoffschlüssige Verbindung durch Kleben:*
Über das Shell-Conduction-Modell werden an den Flächen A_1 und A_2 die Stoffeigenschaften für eine Kleberschicht der Dicke ($h_{Kleber} = 50 \text{ }\mu\text{m}$) vorgegeben. Die verwendeten Stoffwerte entsprechen dabei einem Epoxid-Harz, wie in Tabelle 5.7 aufgeführt. Für die Fläche A_1 ist $R_{Kt, A_1} = 0,366 \text{ K/W}$, für A_2 ist $R_{Kt, A_2} = 0,396 \text{ K/W}$.

Abbildung 6.8a zeigt für die Fälle I-III die berechneten Wärmeströme, die zwischen den Volumina a , b und c (Abbildung 6.7) über die Flächen A_1 und A_2 übertragen werden. Bei einer stoffschlüssigen Verbindung (Abbildung 6.8b) ist der Kontaktwiderstand $R_{Kt} = 0 \text{ K/W}$, daher ist der über die Fläche A_1 übertragene Wärmestrom vergleichsweise groß.



(a) Vergleich der Wärmeströme

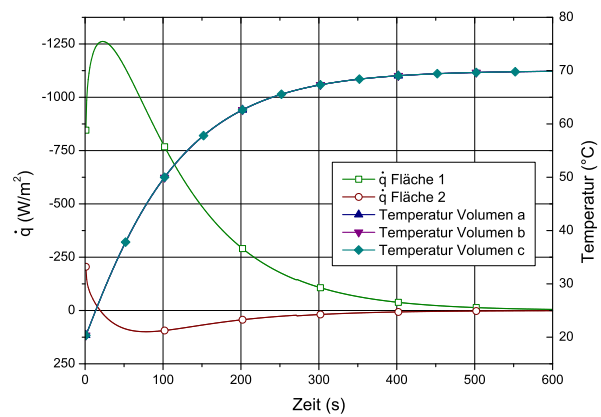
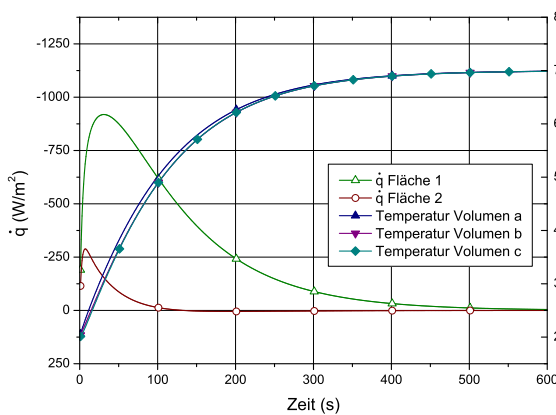
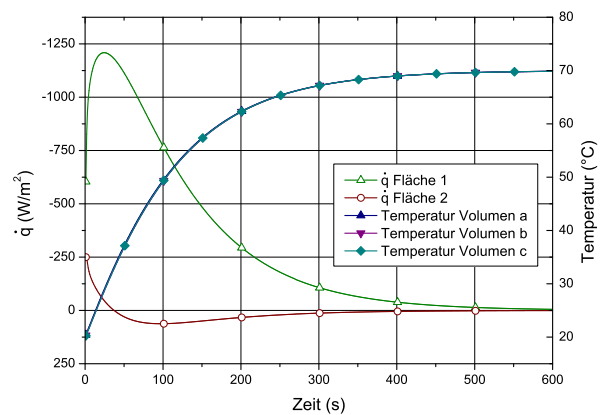

(b) I: Schweißverbindung $R_{Kt,A_1} = 0 \text{ K/W}$

(c) II: Reibkraftschluss $R_{Kt,A_1} = 2,994 \text{ K/W}$

(d) III: Klebeverbindung $R_{Kt,A_1} = 0,366 \text{ K/W}$

Abbildung 6.8.: Transientes Aufheizverhalten Blechfalz

Bei einem hohen Kontaktwiderstand (Abbildung 6.8c) wird ein geringerer Wärmestrom über die Fläche A_1 übertragen, daher erwärmt sich das Volumen a auch im Vergleich zu den Volumina b und c schneller. Die Temperatur von Volumen a liegt um ca. $0,5 \text{ K}$ über den Temperaturen der Volumina b und c . Bei einem niedrigeren Kontaktwiderstand im Fall einer Klebeverbindung verringern sich die Temperaturdifferenzen im zeitlichen Verlauf zwischen den Volumina deutlich (Abbildung 6.8d).

Die Temperaturen weichen zwischen den einzelnen Simulationen um weniger als $\pm 0,5 \text{ K}$ voneinander ab. Ist eine genaue Analyse der Wärmeströme nicht gefordert, kann auf eine detaillierte Abbildung der Kontaktwiderstände an den Fugestellen verzichtet werden.

6.2. Trocknung einer Flugzeug-Außenhaut

Der Verlauf der Trocknung ruhender Güter bei zeitlich veränderlichem Luftzustand ist ein in der industriellen Praxis häufig auftretender Anwendungsfall. Neben Objekten in klassischen Trocknungsöfen mit einem Volumen von einigen Kubikdezimetern bis zu wenigen Kubikmetern werden auch in Hallen mit mehr als 100.000 m³ Objekte getrocknet. *Durst und Scheibe* [29] untersuchen die Strömungsbedingungen in einer Flugzeug-Lackierhalle, beziehen dabei jedoch Trocknungsvorgänge und sich hierdurch einstellende Lösemittelverteilungen in der Halle nicht mit ein.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Flugzeughalle mit einer darin befindlichen Flugzeuggeometrie modelliert, vernetzt und die Trocknung auf der Flugzeugaußenhaut simuliert. Die Außenabmaße der Halle orientieren sich an den Maßen der Lufthansa Lackierhalle in Hamburg und betragen nach *Sauer* [83] $l \cdot b \cdot h = 80 \text{ m} \cdot 38 \text{ m} \cdot 28 \text{ m}$. Als Flugzeuggeometrie wurde das Oberflächenmodell der *DLR-F6*-Geometrie¹ verwendet. Der Geometrie wurden zusätzlich generisch ein Seiten- und Höhenleitwerk hinzugefügt. Ähnlich wie bei der Automobilkarosserie (Kapitel 6.1) wurde auch die Flugzeuggeometrie in einem umhüllenden Quader vernetzt. An den Flächen des Hüllvolumens des Flugzeugs können Randbedingungen vorgegeben oder auch weitere numerische Gitter angehängt werden, um beispielsweise den Einfluss von unterschiedlichen Einlassgeometrien zu untersuchen. Abbildung 6.9 zeigt die Einlass- und Auslassflächen der Halle, die Flugzeugaußenhaut sowie einen Schnitt durch die vernetzten Volumina.

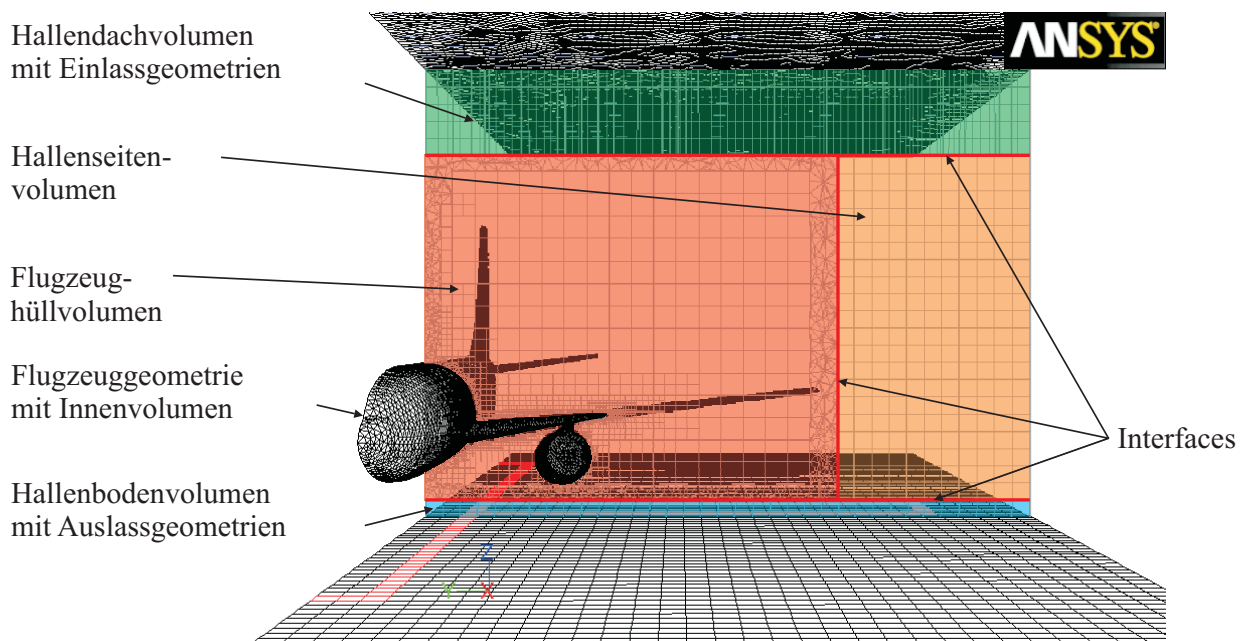


Abbildung 6.9.: Numerisches Gitter eines Flugzeugs in einer Lackierhalle

Die Flugzeugwände wurden als Fläche modelliert, der eine virtuelle, konstante Wanddicke zur Abbildung der Wärmeleitung in der Wand (*Conducting-Shell*-Modell, $h = 0,8 \text{ mm}$) zugewiesen wird. Strukturelle Materialanhäufungen, z.B. durch Stringer, Schweißnähte oder unterschiedliche Materialien der Außenhaut, wurden nicht modelliert. Das Innenvolumen

¹Institute of Aerodynamics and Flow Technology, DLR, Braunschweig

des Flugzeugs ist mit Luft gefüllt, auf eine weitere Modellierung des Innenraumes wurde verzichtet. Damit wird die thermische Trägheit der Inneneinrichtung beim Aufheizen des Flugzeugs vernachlässigt. Am unteren Rand des Hallenbodenvolumens wird eine kreuzförmige Auslassöffnung für die von der Decke einströmende Luft vorgegeben. Am oberen Rand des Hallendachvolumens werden mehrere kreisförmige Einlassöffnungen für die Trocknungsluft modelliert. Mit Ausnahme einer Symmetriebedingung werden alle weiteren Seiten des Flugzeughüllvolumens vom Hallenvolumen umgeben. Abbildung 6.10 zeigt die verschiedenen Randbedingungen in der Draufsicht.

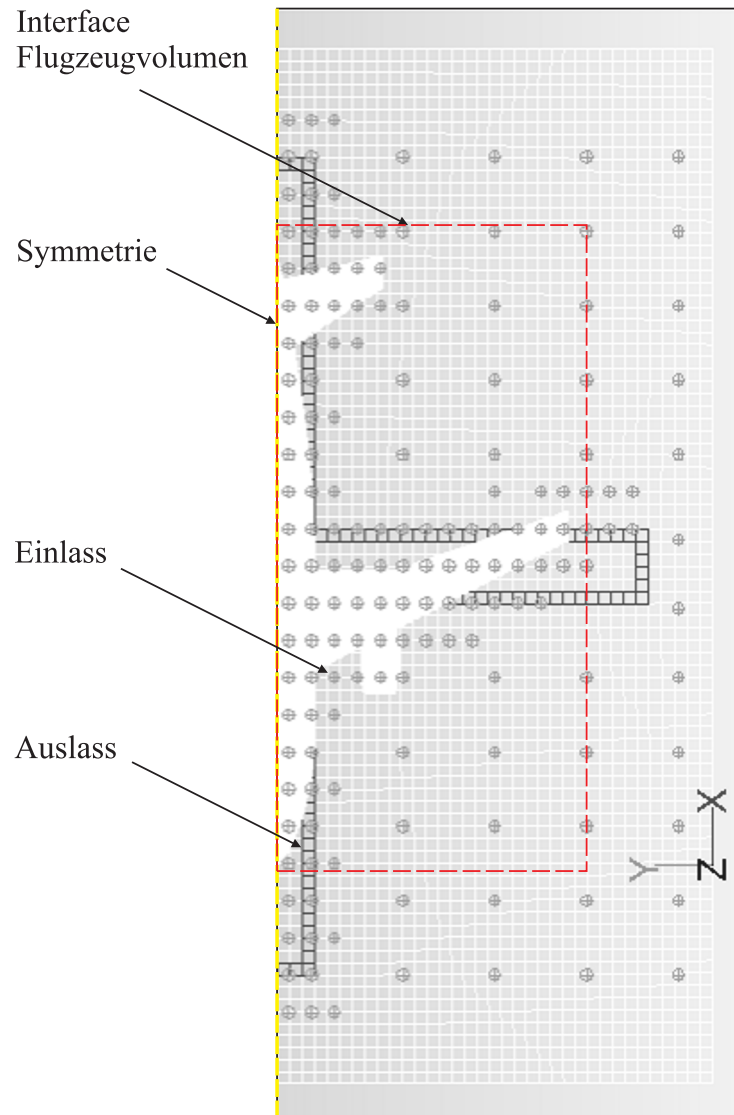


Abbildung 6.10.: Randbedingungen Flugzeugsimulation

Nach der Vernetzung der Flugzeug- und Hallengeometrie hat das Gitter $1,3 \cdot 10^6$ Kontrollvolumina. Die Temperatur in der Halle beträgt initial $t_0 = 15 \text{ °C}$ bei einer absoluten Luftfeuchtigkeit $X_{LU} = 6 \text{ g/kg}_{\text{tr.LU}}$ sowie $X_{BG} = 0 \text{ g/kg}_{\text{tr.LU}}$. Die mit der Geschwindigkeit $u_{LU} = 1 \text{ m/s}$ durch die Einlassgeometrien an der Decke einströmende Luft hat eine Temperatur $t_{LU} = 25 \text{ °C}$. Alle Hallenwände werden adiabatisch angenommen. Bei Simulationsbeginn hat der Lack auf der Flugzeuggeometrie die Schichtdicke $h_0 = 60 \text{ μm}$. Der Lack wurde als Wasserbasislack mit einem Wassermassenanteil $\xi_{WA} = 0,6$ und einem

Butylglykolmassenanteil $\xi_{BG} = 0,2$ angenommen. Die Simulation vernachlässigt den Applikationsprozess sowie den in die Hallenluft eingetragenen Lösemittelmassenstrom durch Overspray. Ziel der Simulation ist daher nicht die exakte Vorhersage des Lösemittelgehaltes in der Abluft, sondern die Identifikation möglicher Problemzonen bei der Trocknung.

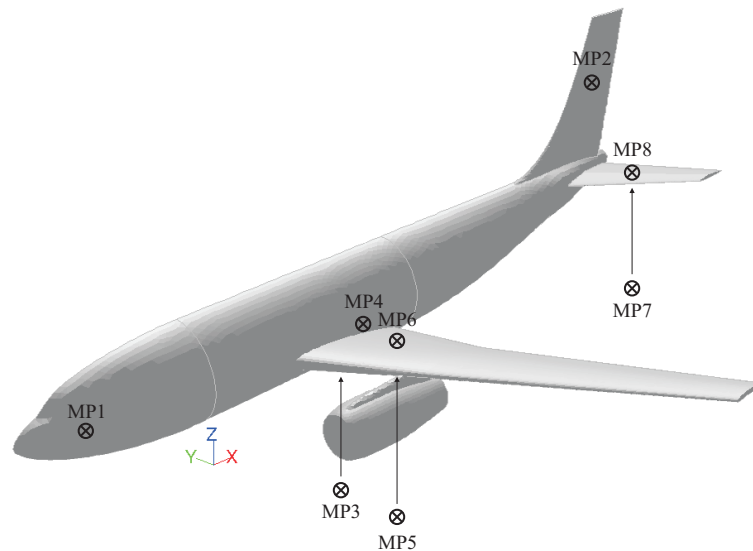


Abbildung 6.11.: Messpunkte auf Flugzeuggeometrie

Die Trocknung wird an verschiedenen Kontrollpunkten verfolgt. Abbildung 6.11 zeigt Benennung und Lage dieser Kontrollpunkte. Der zeitliche Temperaturverlauf an den Kontrollpunkten ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

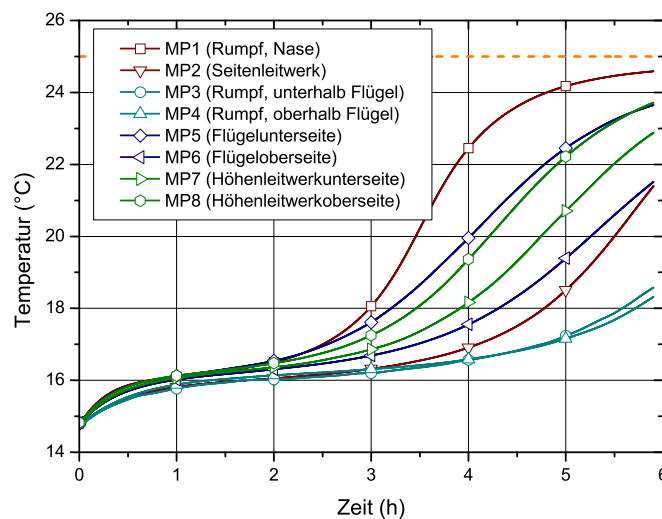


Abbildung 6.12.: Temperaturverlauf an den Messpunkten auf der Flugzeuggeometrie

Nach 6 Stunden Trocknungszeit ist an der Flugzeugnase an MP1 die Trocknung abgeschlossen, die Umgebungstemperatur von $t_{LU} = 25\text{ °C}$ ist nahezu erreicht. Am Seitenleitwerk

(MP2) hingegen ist die Trocknung noch nicht abgeschlossen. Deutlich langsamer verläuft die Trocknung am Rumpf unterhalb (MP3) und oberhalb (MP4) des Tragflügels. Die Flügelgeometrie schirmt diese Bereiche des Rumpfes von der Umströmung ab. Bemerkenswert ist weiterhin, dass der Bereich auf der Flügelunterseite um MP5 schneller als auf der Flügeloberseite um MP6 trocknet. Dies ist auf eine Beschleunigung der Strömung unterhalb des Flügels aufgrund der Umströmung des Triebwerkes zurückzuführen. Erwartungsgemäß verläuft hingegen die Trocknung der Höhenleitwerkoberseite um MP7 schneller als auf der Höhenleitwerkunterseite am MP8.

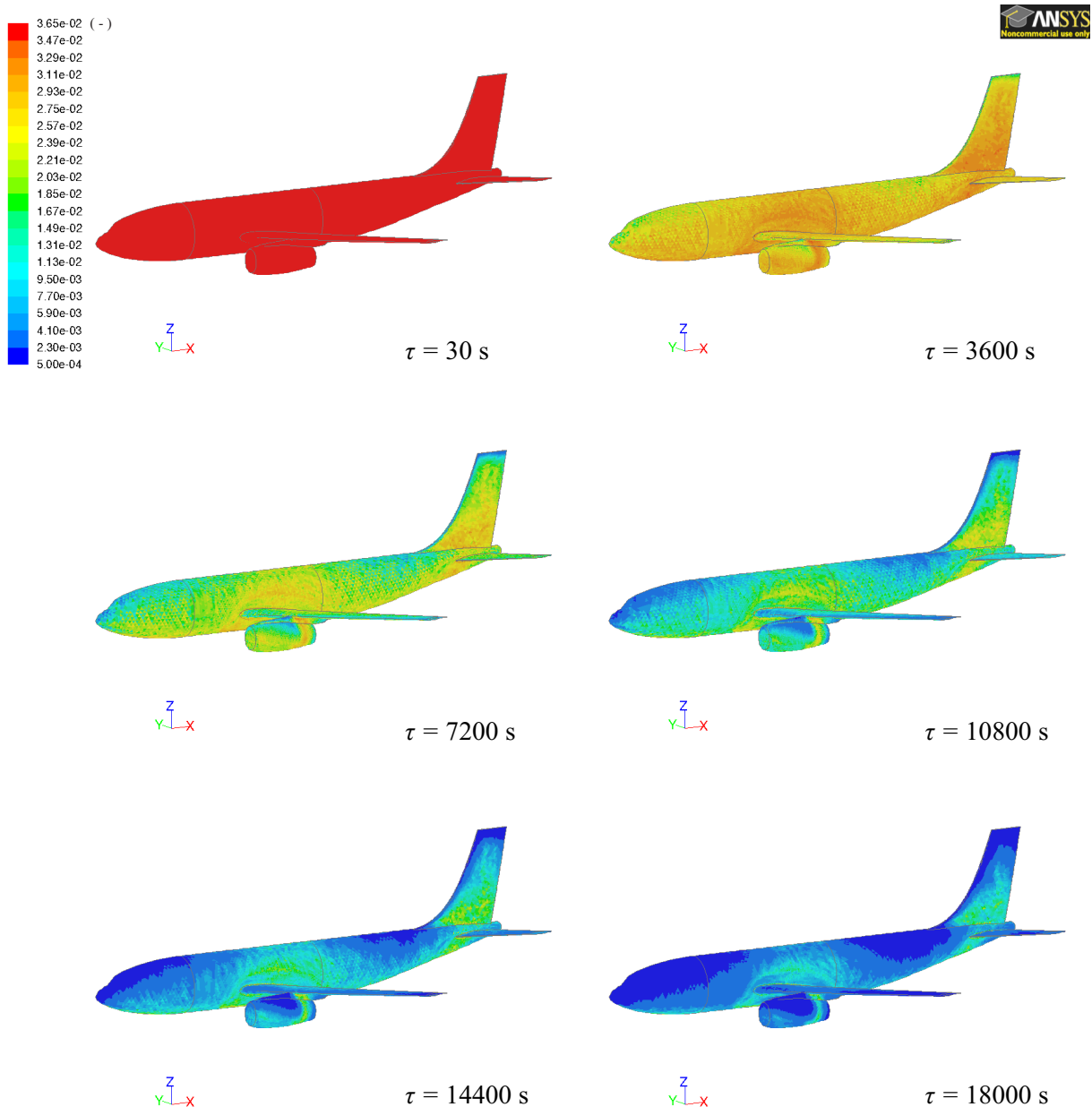


Abbildung 6.13.: Simulierter mittlerer Wassergehalt $\bar{\xi}_{WA}$ in der Lackschicht

Der über die Schichtdicke gemittelte Wassergehalt des applizierten Lackes ist in Abbildung 6.13 für den Trocknungsverlauf dargestellt. Wie schon durch den Temperaturverlauf an den einzelnen Messpunkten ersichtlich, ist die Trocknung am Seitenleitwerk und am Rumpf

unterhalb des Höhenleitwerks sowie unter- und oberhalb des Tragflügels und an Teilen des Triebwerks deutlich verzögert.

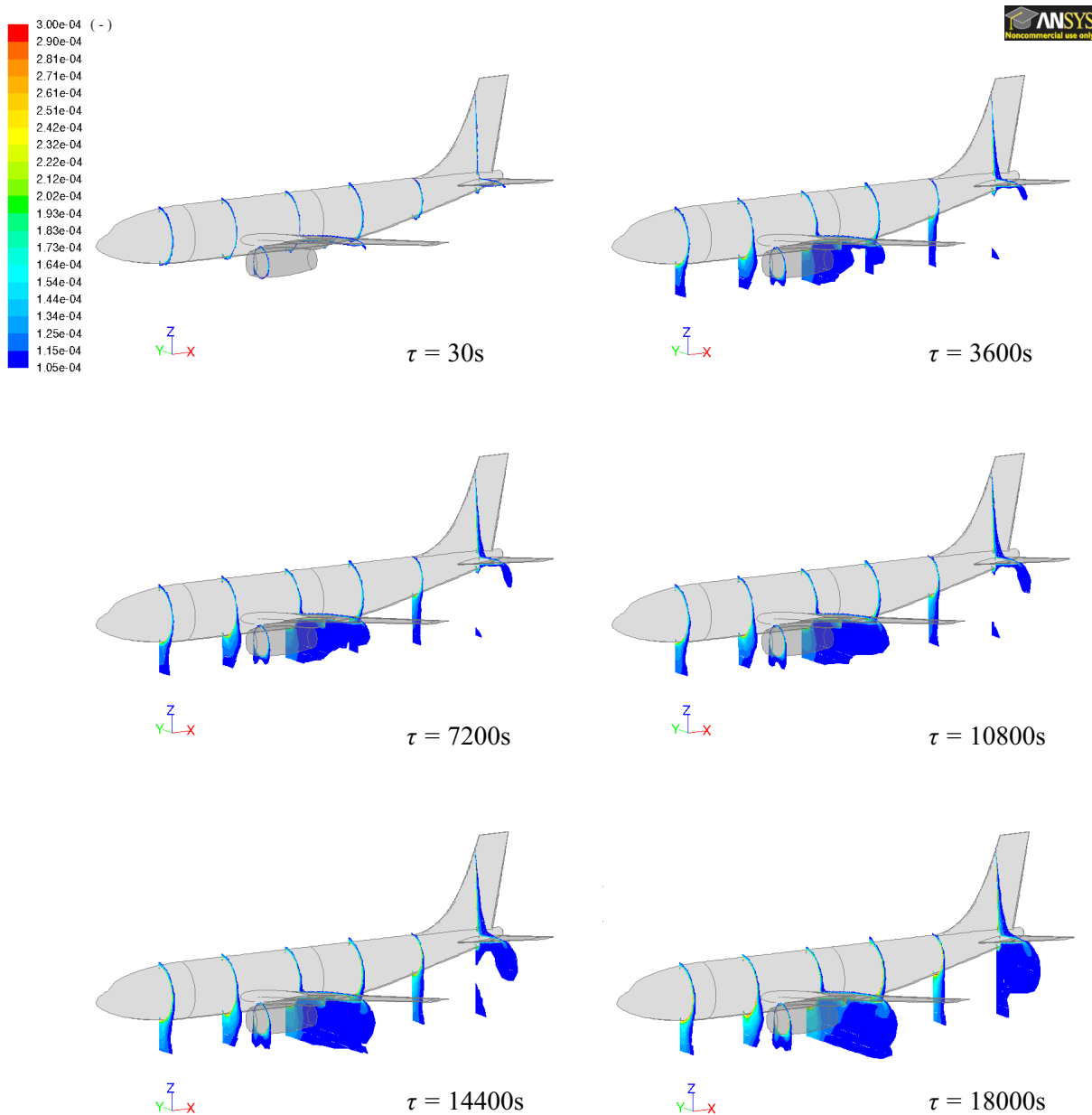


Abbildung 6.14.: Simulierte Lösemittelverteilung in der Hallenluft

Abbildung 6.14 zeigt die Lösemittelverteilung von Butylglykol in der Hallenluft zu verschiedenen Zeitpunkten der Trocknung. Durch das vorrangige Verdunsten von Wasser ist die Butylglykol-Konzentration zunächst niedrig und nimmt erst nach etwa zwei Stunden Trocknungszeit deutlich zu und geht nach Abschluss der Trocknung wieder zurück. Anhand der Lösemittelverteilung ist ersichtlich, dass nur geringfügige Anreicherungen von Lösemittel in kaum durchströmten Bereichen der Halle zu erwarten sind. Das Trocknungsmodell kann somit auch zur Vorhersage von Problembereichen bei der Hallendurchlüftung herangezogen werden.

6.3. Trocknung in einem Bandtrockner

Die Trocknung von kontinuierlich bewegten Gütern durch eine Konvektionstrocknungsanlage kann durch das in Kapitel 4 aufgestellte Trocknungsmodell ebenfalls beschrieben werden. Voraussetzung sind Beschichtungssysteme, deren Trocknungsverhalten dem einer Dispersionstrocknung entsprechen. Anwendungsfälle stellen z.B. die Bandbeschichtung von Aluminium- oder anderen metallischen Werkstoffen sowie Kunststoffbahnen dar [48]. Abbildung 6.15 zeigt schematisch eine Bandbeschichtungsanlage. Das zu beschichtende Substrat wird von einer Haspel abgerollt und nach einer Reinigung vorbehandelt. Danach erfolgt eine mehrfache Lackapplikation mit jeweils anschließender Trocknung. Ist der abschließende Decklack aufgebracht und getrocknet, wird das Substrat wieder auf einer Haspel aufgerollt.

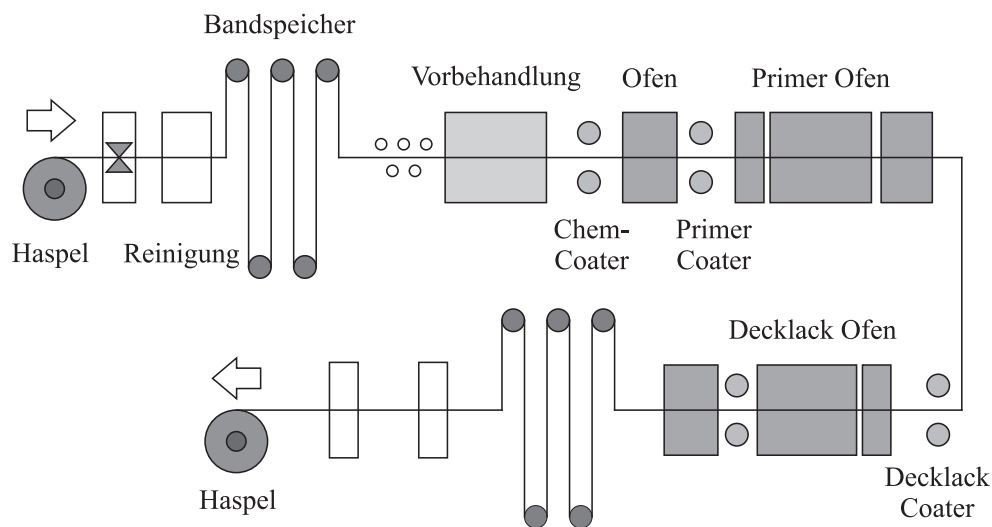


Abbildung 6.15.: Schema eines Bandbeschichtungsprozesses nach *Jandel* [48]

Zur Berechnung des Trocknungsprozesses muss sowohl der konvektive Wärme- und Stofftransport in der Fluidzone im Trocknungs-ofen als auch die Bewegung des Substrates durch den Trockner abgebildet werden. Weiterhin muss, insofern für den Wärmetransport relevant, auch Strahlung berücksichtigt werden. Das Substrat im Trocknungs-ofen kann schwebend, durchhängend oder in mehreren Schlaufen hängend im Trockner orientiert sein. Bewegt sich das Substrat nicht auf einer Geraden oder einer Kreisbahn durch den Trockner, kann die Bewegung nicht mehr als Starrkörperbewegung abgebildet werden [11]. Im folgenden wird daher ein Modell zur Gitterbewegung vorgestellt, mit dessen Hilfe ein Hexaedernetz entlang einer beliebig wählbaren Bahn bewegt werden kann. Durch die Bewegung des Gitters durch den Trockner wird die Bewegung des Substrates durch den Trockner und einem auf der Oberfläche des Substrates trocknenden Lackfilm abgebildet.

Abbildung 6.16 zeigt den schematischen Aufbau eines Netzes zur Simulation der Wärme- und Stofftransportvorgänge in einem Bandtrockner. Durch die Fluidzone wird ein mit Hexaedern vernetzter Festkörper bewegt, welcher das Substrat repräsentiert.

Am „Einlass“ des Bandes in den Trockner werden, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit u_{Band} , durch das „Dynamic Layering“ neue Hexaedern generiert und anschließend mittels einer User-Defined-Function „DEFINE_GRID_MOTION“ (Tabelle 4.5, Seite 54) bewegt. Die Generierung der Zellen am Einlass erfolgt derart, dass die Zellen in Bandrich-

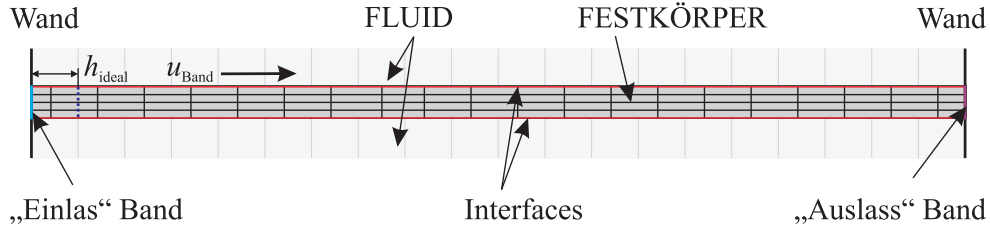


Abbildung 6.16.: Schematischer Netzaufbau in einem Bandtrockner

tung einen äquidistanten Abstand aufweisen. Zur Generierung der Zellen gilt nach dem FLUENT Theory Guide [3]²:

$$h_{min} > (1 + \alpha_S)h_{ideal} \quad (6.1)$$

mit der Zellenhöhe h_{ideal} und dem *Split*-Faktor α_S . Am „Auslass“ des Bandes aus dem Trockner werden die bewegten Hexaederezellen wieder gelöscht. Als Bedingung gilt hier nach dem FLUENT Theory Guide [3]³:

$$h_{min} < \alpha_C h_{ideal} \quad (6.2)$$

mit der Zellenhöhe h_{ideal} und dem *Collapse*-Faktor α_C . Die Substratoberfläche wird mittels einer Interface-Schnittstelle mit der umgebenden Fluidzone gekoppelt.

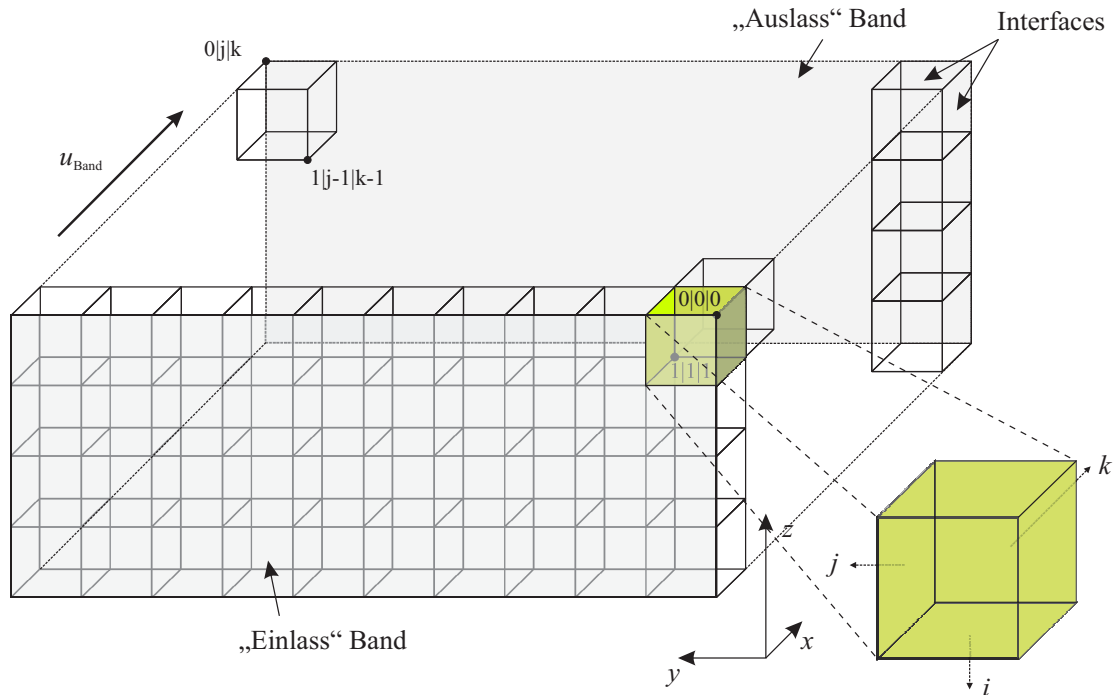


Abbildung 6.17.: Hexaedernetz Substrat

Zur Bewegung des Substrates durch den Trockner werden alle Substratzellen ausgehend von der Fläche „Einlass Band“, wie in Abbildung 6.17 dargestellt, am Ende jedes Zeitschrittes

²Fluent Theory Guide, Gleichung 3.3-7

³Fluent Theory Guide, Gleichung 3.3-8

mittels einer „DEFINE_EXECUTE_AT_END“-Funktion durchlaufen. Die Hexaedernetzstruktur wird dabei mittels der Position der Knoten $i, j, k \in \mathbb{N}$ an den Zellecken sowie der absoluten Koordinaten x, y, z in einer Tabelle abgelegt.

Anhand der senkrecht zur Bewegungsrichtung stehenden Flächen wird in jeder Zelle ein Bewegungsvektor errechnet und die Knotenpositionen entsprechend modifiziert. Die neu berechneten Koordinaten des Hexaedernetzes werden in eine Datei gespeichert und in FLUENT zur Netzbewegung über die User-Defined-Function „DEFINE_GRID_MOTION“ für den nächsten Zeitschritt vorgegeben.

Zur Vorgabe der Bewegung des Substratnetzes können die Geschwindigkeit des Substrates u_{Band} sowie die Einlassfläche mittels der in Abbildung 6.18 dargestellten Eingabemaske eingegeben bzw. ausgewählt werden.

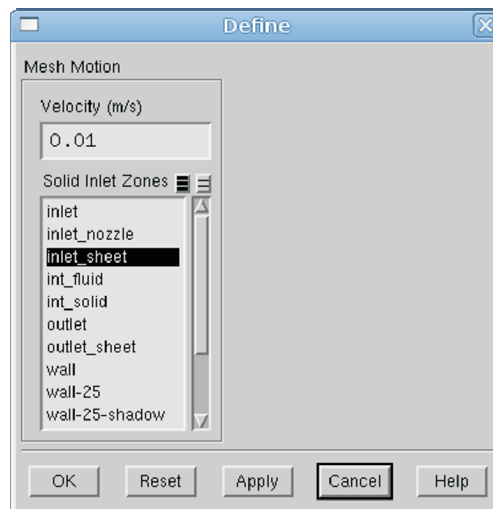


Abbildung 6.18.: Eingabemaske für die Gitterbewegung

Das Trocknungsmodell wird, analog zu den Simulationen ohne bewegtes Gitter (Kapitel 6.2), in die Strömungssimulation eingebunden und initialisiert. Zusätzlich muss an der Substratoberfläche die absolute Geschwindigkeit der Schleppströmung als Randbedingung vorgegeben werden. Dies erfolgt mittels einer „DEFINE_PROFILE“-Funktion (Tabelle 4.5), welche die Geschwindigkeit in den absoluten Koordinaten x, y, z an der Substratoberfläche berechnet.

Während einer Simulation werden die am Einlass neu generierten Zellen am Ende eines Zeitschrittes mit einer „DEFINE_EXECUTE_AT_END“-Routine (Tabelle 4.5) identifiziert und entsprechend der Startbedingungen in der Eingabemaske für den Lackfilm (Abbildung 6.1) initialisiert.

Die Funktionsweise des Trocknungsmodells in einem Bandtrockner wird im Folgenden an einem generischen Trockner demonstriert. Der in Abbildung 6.19 dargestellte Durchlauf-trockner hat die Aussenabmaße $l \cdot b \cdot h = 300 \text{ mm} \cdot 120 \text{ mm} \cdot 300 \text{ mm}$. Die Gasphase ist mit $2,0 \cdot 10^5$ Kontrollvolumina diskretisiert, davon sind $3,6 \cdot 10^4$ Kontrollvolumina in einer dreilagigen prismatischen Schicht zur Auflösung der Grenzschicht an der Substratoberfläche angeordnet. Die Querschnittsfläche des Substrates beträgt $b_{Band} \cdot s_{Band} = 80 \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm}$ und ist über die Länge von $l_{Band} = 457 \text{ mm}$ durch den Trockner konstant. Das Substrat ist mit 3200 Kontrollvolumina diskretisiert. Auf die Modellierung der Rollen zur Umlenkung des Substrates im Trockner wurde verzichtet. Der Einfluss der Walze auf die Strömung

im Trockner sowie ein etwaiger konduktiver Wärmeeintrag in das Substrat werden damit vernachlässigt. Die Berücksichtigung dieser Einflüsse sind zur Demonstration der Funktionsweise des Trocknungsmodells und der Gitterbewegung nicht notwendig.

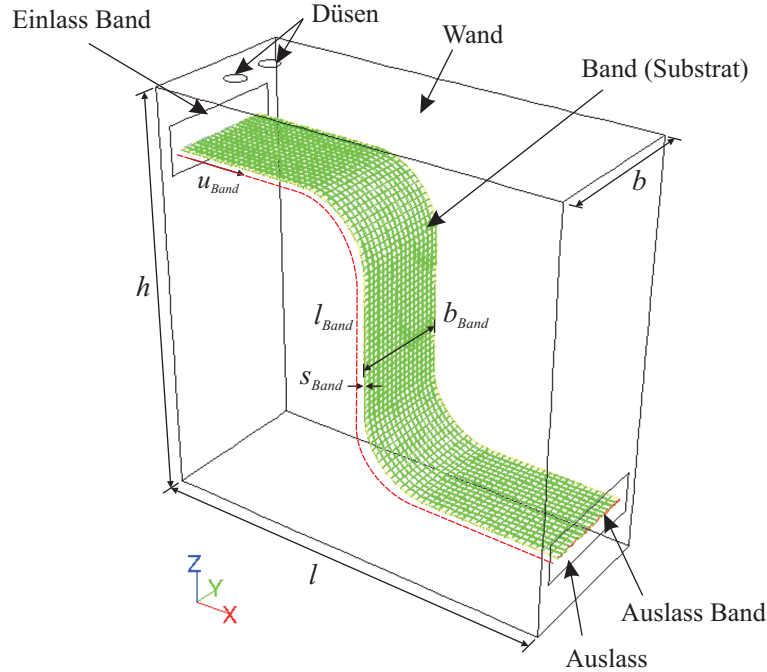


Abbildung 6.19.: Aufbau Durchlauftrockner

Die Einlassgeschwindigkeit an den Düsen beträgt $u_{Düse} = 1$ m/s bei einer Temperatur $T_{Düse} = 340$ K und den Lösemittelbeladungen $X_{LU} = 5$ g/kg_{tr.LU} und $X_{BG} = 1$ g/kg_{tr.LU}. Am Einlass gilt $u_{Einlass} = u_{Band} = 0,01$ m/s bei einer Temperatur $T_{Einlass} = T_{Band} = 300$ K. Die Lösemittelkonzentrationen an der Düse wurden am Einlass wie auch am Auslass für eine etwaige Rückströmung vorgegeben. Am Auslass wurde weiterhin der statische Druck $p = 1,013$ bar vorgegeben.

Die Berechnung der Trocknung erfolgt in einer instationären Simulation mit einer Zeitschrittweite $\Delta\tau = 0,1$ s. Bei einer Zellhöhe $h_{min} = 5$ mm und einem Split-Faktor $\alpha_S = 0,6$ im Substrat ergibt sich mit der Bandgeschwindigkeit u_{Band} in jedem vierten Zeitschritt eine Zellteilung. Für den Collapse-Faktor wurde $\alpha_C = 0,4$ gewählt. Die im folgenden gezeigten Ergebnisse wurden nach einer Simulationsdauer $\tau = 90$ s aufgenommen. Das entspricht einer zweifachen vollständige Banddurchfahrt durch den Trockner.

Die aus der Strömungssimulation resultierenden Stromlinien sind in Abbildung 6.20 ausgehend von der Düse bzw. dem Einlass aufgetragen. Die Einfärbung der Stromlinien entspricht der Strömungsgeschwindigkeit. Die Strömungsgeschwindigkeit ist im gesamten Trockner gering. Lediglich am Auslass sowie oberhalb des Substrates im Bereich der Düsen werden Geschwindigkeiten oberhalb 0,2 m/s erreicht. Aufgrund des großen Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit auf die Trocknungsdauer (Kapitel 5.2.1, Abbildung 5.5) ist in diesen Regionen mit einem großen Massenstrom aus dem Lackfilm an die Gasphase zu rechnen.

Wie schon anhand der Strömung erwartet, ist in Bereichen hoher Strömungsgeschwindigkeit in Substratnähe auch der Lösemittelmassenstrom aus dem Substrat erhöht. Abbildung

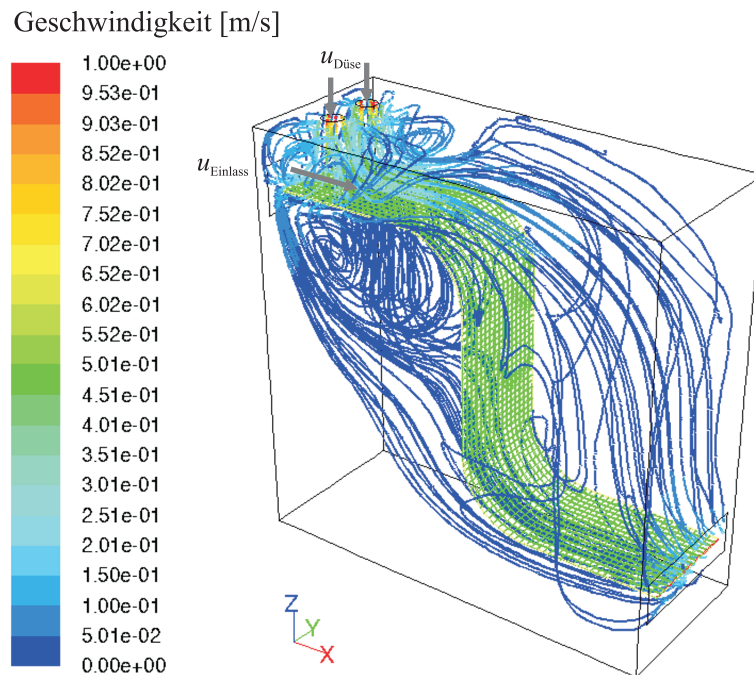


Abbildung 6.20.: Strömungslinien im Durchlauftrockner

6.21 zeigt den flächenbezogenen Massenstrom von Butylglykol aus dem Substrat in die Gasphase. Der Massenstrom fällt im Bereich der Düsengeometrie am größten aus. Aufgrund der Diskretisierung des Substrates ist ein etwaiger Einfluss des Staupunktes auf den Massenstrom nicht erkennbar. Hierzu müsste das Substrat feiner diskretisiert werden. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch nur die Funktionsfähigkeit des Trocknungsmodells auf den Oberflächen bewegter Kontrollvolumina demonstriert werden soll, wurde auf eine weitergehende Betrachtung verzichtet.

Der sich in der Gasphase aufgrund der Trocknung einstellende Butylglykolmassenanteil ξ_{BG} ist in Abbildung 6.22 auf drei Ebenen dargestellt. Unmittelbar unterhalb der Düsen ist der Lösemittelgehalt gering. Nach der ersten Umlenkung des Bandes stellt sich in der Gasphase ein Bereich mit hoher Lösemittelkonzentration ein. Dies ist gleichzeitig der Bereich mit einer nur sehr geringen Strömungsgeschwindigkeit, wie aus Abbildung 6.20 hervorgeht, daher sind in diesem Bereich keine Strömungslinien aufgetragen.

Eine Berechnung von Trocknungsvorgängen auf einem bewegten Gitter ist somit möglich. Im Gegensatz zu der Karosserie in Kapitel 6.1 ist die zu trocknende Oberfläche im bewegten Gitter gleichzeitig das Interface zu der ruhenden Umgebung. Die hier gezeigte Ergebnisse für den Bandtrockner konnten nicht validiert werden, da es sich bei der Trocknergeometrie um ein generisches Beispiel handelt. Zur Optimierung des hier betrachteten generischen Trockners wäre es anhand der Resultate aus der Simulation empfehlenswert, die Totvolumina im Trockner zu reduzieren. Damit können in der Mitte des Bandes die Überströmungsgeschwindigkeit am Substrat erhöht und somit die Bereiche mit einem hohen Verdunstungsmassenstrom aus dem Lackfilm vergrößert werden.

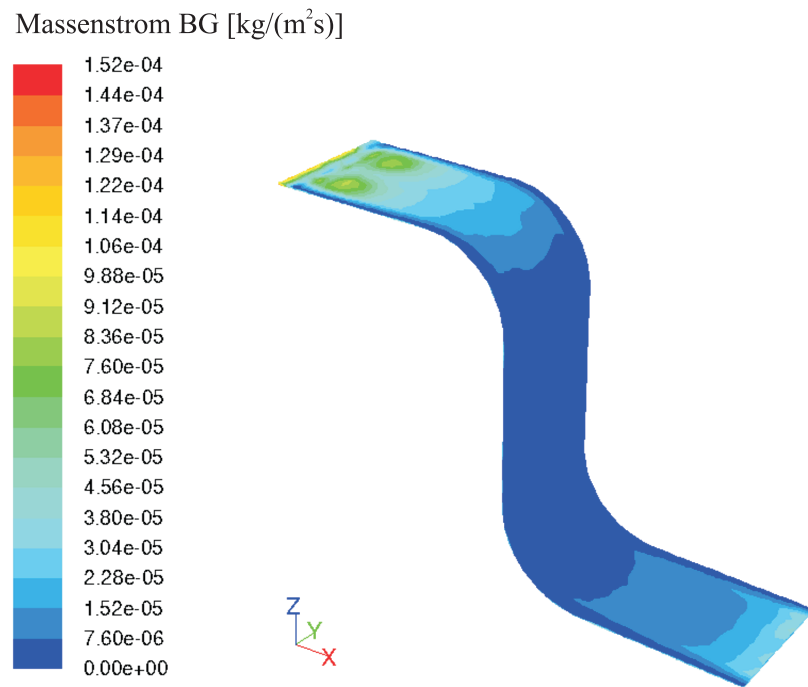


Abbildung 6.21.: Massenstrom \dot{M}_{BG} aus dem Lackfilm

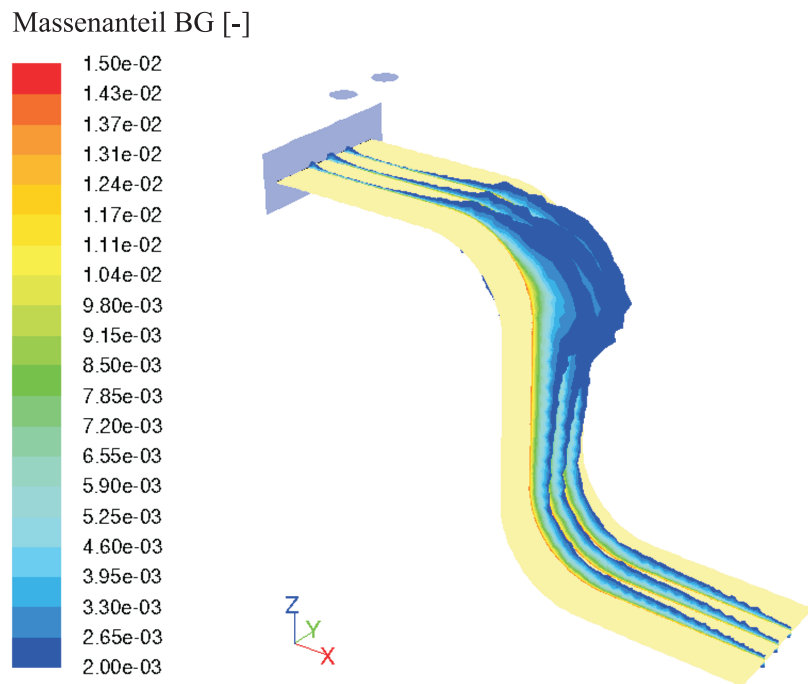


Abbildung 6.22.: Verteilung ξ_{BG} in der Strömung

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war eine detaillierte thermodynamische Charakterisierung des Trocknungsprozesses von farbgebenden Wasserbasislacken und die Abbildung des Trocknungsprozesses in einer Simulation.

An einer Laboranlage wurden die Trocknung von industriell eingesetzten Wasserbasislacksystemen sowie eines Modelllacksystems genauer untersucht. Dabei wurden Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit sowie die Anströmungsform variiert. Neben einem ebenen Probeblech in Prall- und Parallelanströmung wurde auch die Trocknung auf einem Z-förmigen Probeblech gemessen. Während der Trocknung wurden die Blechtemperatur und die Abnahme der Lackmasse sowie die Konzentration von organischem Lösemittel in der Abluft erfasst. Die generische Versuchsanlage ist so aufgebaut, dass alle für die Trocknung relevanten Parameter erfasst werden und in einer Simulation als Randbedingungen vorgegeben werden können.

Zur Modellierung der Trocknung wurden die Transportgleichungen für den Stofftransport senkrecht zur freien Lackoberfläche aufgestellt und mit der Finte-Volumen-Methode diskretisiert. Die für die Simulation notwendigen Reinstoffdaten für das Modelllacksystem wurden der Literatur entnommen und konzentrations- sowie temperaturabhängig berechnet. Die verwendeten Reallacke werden durch ein ternäres Modelllacksystem, bestehend aus Wasser, Butylglykol und Polyurethan, repräsentiert. Für die in den Experimenten verwendeten Modelllacke konnte eine gute Übereinstimmung mit den entsprechenden Simulationen nachgewiesen werden. Für das Modelllacksystem werden ausführliche Parameterstudien präsentiert. Weiterhin wurde gezeigt, dass auch Reallacke mit dem ternären Modelllacksystem gut abbildbar sind.

Die Anwendbarkeit des Trocknungsmodells auf Fragestellungen aus der industriellen Praxis wurde exemplarisch anhand von drei Beispielen demonstriert:

- Die Trocknung einer Lackschicht auf einer Golf-V-Karosserie wurde in einem generischen Durchlauftrockner berechnet.
- In einer Flugzeughalle wurde die Lösemittelkonzentrationsverteilung während der Trocknung einer Lackschicht auf einer Flugzeuggeometrie berechnet. Mögliche Problemzonen auf der Flugzeugaußenhaut wurden identifiziert.
- Zur Berechnung der Trocknung von kontinuierlich bewegten Gütern durch einen Trockner wurde das Trocknungsmodell auf bewegte Zellen angewendet. Damit können die Strömungsvorgänge in einem Durchlaufbandtrockner simuliert werden.

Allerdings konnten die Ergebnisse der Anwendungsbeispiele für das Trocknungsmodell nicht mit Messdaten verglichen werden. Bereitstellung und Vergleich von Messdaten aus realen Anwendungsfällen mit Simulationsergebnissen stellen einen Ansatzpunkt für zukünftige, simulative Arbeiten dar. Die Abbildungen 7.1 (a)-(i) nach Kröll [58] zeigen schematisch mögliche Anwendungsfälle für das vorgestellte Trocknungsmodell. Auf diffusionsdichten Oberflächen kann neben der Trocknung bei freier Konvektion (a) auch die Trocknung

in einem Außenluft-Überströmtrockner (b) oder einem schwerkraftbelüfteten Überström-Kammertrockner (c) berechnet werden. Ebenso ist die Auslegung eines Strahlungstrockners (d), eines Prallstrahltrockners (e) und eines Überström-Wagendurchlauftrockners (f) möglich. Die Berechnung der Trocknung für kontinuierlich bewegte Güter kann für Überström-Förderrollentrockner (g), Überström-Förderbandtrockner (h) und Prallstrahl-Rollenbahntrockner (i) erfolgen.

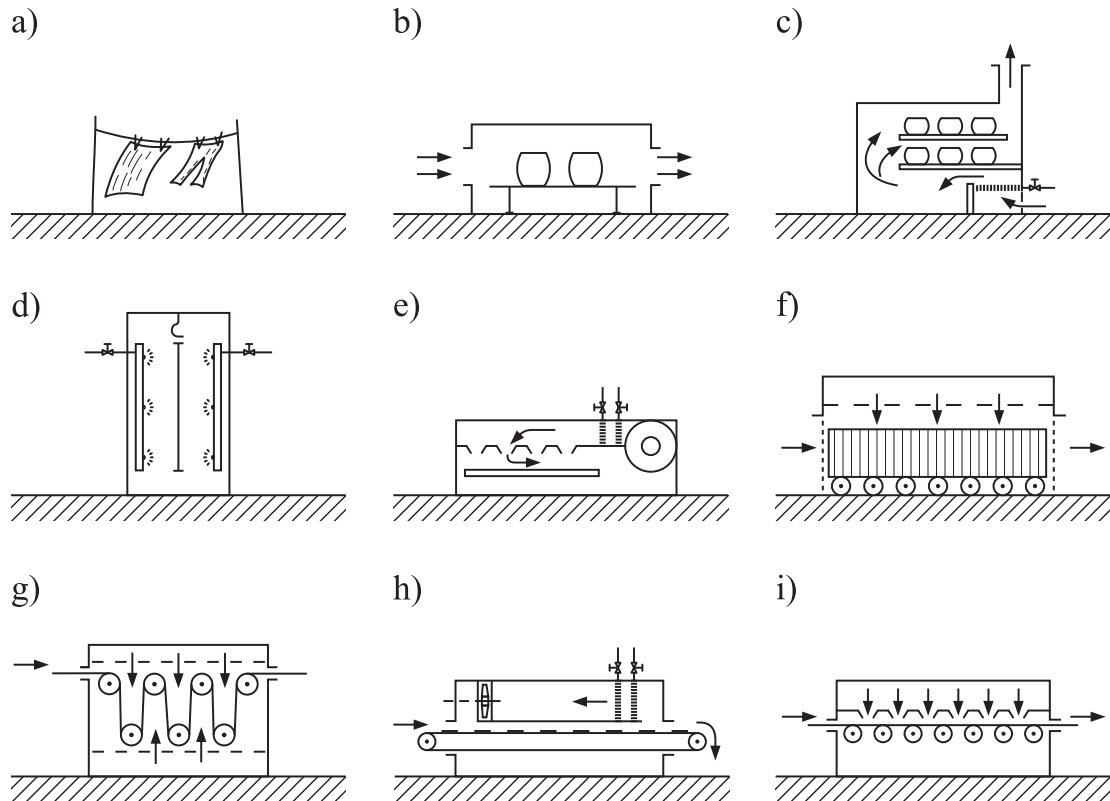


Abbildung 7.1.: Simulativ abbildbare Trocknerbauarten

Die Annahme eines diffusionsdichten Substrates sollte durch Ankopplung eines Transportmodells für poröse Materialien abgelöst werden. Damit können die Trocknungsprozesse von auf Fasermaterialien, wie etwa Papier, applizierten Lackschichten berechnet werden. Für eine realistischere Abbildung einer Lackieranlage (z.B. einer Flugzeughalle) wäre weiterhin die Integration der vorhandenen Beschreibungen des Zerstäubungs- und Applikationsprozesses [73] wünschenswert.

Die Ankopplung eines empirischen Fehlermodells könnte helfen, mit Erfahrungswerten aus der Praxis die zu erwartende Güte der Lackschicht hinsichtlich der in Kapitel 1.1 genannten Kriterien anhand des Prozessverlaufes zu bewerten. So könnte die Fehlstellenneigung des Lackfilms durch Überprüfung des Einhaltens von Prozessparametern wie etwa der Temperaturhaltezeit¹ bewertet und im Postprocessing der Simulation mit einem Ampelsystem auf der Geometrie visualisiert werden.

Für weitergehende experimentelle Untersuchungen sollten weiterhin Messdaten für Diffusionskoeffizienten und chemischen Aktivitäten anderer Lacksysteme aufgenommen und im

¹Die *Temperaturhaltezeit* wird vom Lackmaterialhersteller vorgegeben. Wird ein Lackfilm für eine vorgegebene Zeitdauer auf einer bestimmten Temperatur oberhalb der Raumtemperatur gehalten, kann nach dem Abkühlen von der Erfüllung vorher festgelegter Qualitätsmerkmale ausgegangen werden.

Trocknungsmodell hinterlegt werden. Damit könnten Reallacksysteme einfacher als Modell-lacksystem abgebildet werden. Außerdem müssen die vorliegenden Stoffdaten hinsichtlich der Niedertemperaturtrocknung verifiziert werden. Ferner sollte der Einfluss der Vernetzung schon zwischengetrockneter Lackschichten quantifiziert werden.

Anhang

A. Stoffdaten

Die Molmassen für die einzelnen Stoffe sind:

Molmasse Wasser

$$\bar{M}_{WA} = 18,015 \text{ kg/kmol} \quad (\text{A.1})$$

Molmasse Butylglykol

$$\bar{M}_{BG} = 118,1742 \text{ kg/kmol} \quad (\text{A.2})$$

Molmasse Polyurethan

$$\bar{M}_{PU} = 4000,0 \text{ kg/kmol} \quad (\text{A.3})$$

Molmasse Luft

$$\bar{M}_{LU} = 28,9644 \text{ kg/kmol} \quad (\text{A.4})$$

A.1. Gasphase

A.1.1. Wasserdampf

Die Stoffdaten von Wasserdampf wurden von *Vargaftik* [104] übernommen und mit Polynomen angenähert. Es gilt:

$$Y = A + B1 \cdot T + B2 \cdot T^2 + B3 \cdot T^3 \quad (\text{A.5})$$

Die Koeffizienten zu den jeweiligen Stoffwerten sind in Tabelle A.1 angegeben.

	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$c_p \text{ [J/(kg K)]}$	$\lambda \text{ [W/(K m)]}$	$\eta \text{ [Pa s]}$
A	$-6,039861 \cdot 10^1$	$-1,35561589 \cdot 10^3$	$-2,36 \cdot 10^{-2}$	$-3,8993 \cdot 10^{-6}$
B1	$5,7211 \cdot 10^{-1}$	$3,221024 \cdot 10^1$	$3,10542 \cdot 10^{-4}$	$4,2796 \cdot 10^{-8}$
B2	$-1,81 \cdot 10^{-3}$	$-1,0989 \cdot 10^{-1}$	$-8,61351 \cdot 10^{-7}$	$1,19099 \cdot 10^{-11}$
B3	$1,90729 \cdot 10^{-6}$	$1,28335 \cdot 10^{-4}$	$1,00914 \cdot 10^{-9}$	$-3,23217 \cdot 10^{-14}$

Tabelle A.1.: Koeffizienten der Stoffwertpolynome für Wasserdampf

A.1.2. Butylglykoldampf

Die Gleichungen nach der DIPPR-Stoffdatenbank [107] für Butylglykoldampf gelten, insofern nicht anders angegeben, im Bereich von 0 °C bis 100 °C.

Dichte

$$\rho = \exp\left(95,709 - \frac{9789,3}{T} - 10,205 \cdot \log(T) + 8,8492 \cdot 10^6\right) \cdot \frac{\bar{M}_{BG}}{\bar{R} \cdot T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] \quad (\text{A.6})$$

Spez. Wärmekapazität

Bei Temperaturen größer 25 °C gilt nachfolgende Korrelation.

$$c_p = \frac{1}{\bar{M}_{BG}} \cdot \left[1,838 \cdot 10^5 + 2,327 \cdot 10^5 \left(\frac{699,9/T}{\sinh(699,9/T)} \right)^2 + 1,72 \cdot 10^5 \left(\frac{1959,9/T}{\cosh(1959,9/T)} \right)^2 \right] \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right] \quad (\text{A.7})$$

Die Gleichung kann im verwendeten Temperaturbereich linearisiert werden. Es gilt:

$$c_p = 294,97 + 3,7328 \cdot T \quad (\text{A.8})$$

Wärmeleitung

$$\lambda = \frac{1,865 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0,9407}}{1 + 704/T} \left[\frac{\text{W}}{\text{K m}} \right] \quad (\text{A.9})$$

Dynamische Viskosität

$$\eta = 3,6629 \cdot 10^{-8} \cdot T^{0,90894} [\text{Pa s}] \quad (\text{A.10})$$

A.1.3. Trockene Luft

Die Stoffdaten für trockene Luft wurden im Bereich von 0 °C bis 200 °C dem *VDI-Wärmeatlas* [105] entnommen und durch ein Polynom in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben.

$$Y = A + B1 \cdot T + B2 \cdot T^2 + B3 \cdot T^3 \quad (\text{A.11})$$

Die Koeffizienten für die einzelnen Stoffwerte sind nachfolgender Tabelle A.2 zu entnehmen.

	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg K)]	λ [W/(K m)]	η [Pa s]
A	3,95541	$1,00845323 \cdot 10^3$	$-7,63326 \cdot 10^{-4}$	$-3,45931 \cdot 10^{-7}$
B1	$-1,667 \cdot 10^{-2}$	$-8,12159 \cdot 10^{-4}$	$1,09491 \cdot 10^{-4}$	$8,13452 \cdot 10^{-8}$
B2	$3,09058 \cdot 10^{-5}$	$-1,72148 \cdot 10^{-4}$	$-7,74599 \cdot 10^{-8}$	$-7,33671 \cdot 10^{-11}$
B3	$-2,12763 \cdot 10^{-8}$	$5,31608 \cdot 10^{-7}$	$4,01149 \cdot 10^{-11}$	$4,12768 \cdot 10^{-14}$

Tabelle A.2.: Koeffizienten der Stoffwertpolynome für trockene Luft

A.2. Substrat

A.2.1. Stahl

Dichte

$$\rho = 8030 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{A.12})$$

Spez. Wärmekapazität

$$c_p = 502,48 \text{ J/(kg K)} \quad (\text{A.13})$$

Wärmeleitung

$$\lambda = 16,27 \text{ W/(K m)} \quad (\text{A.14})$$

Emissionskoeffizient¹

$$\epsilon = 0,95 \quad (\text{A.15})$$

A.3. Kanalwand

A.3.1. Aluminium

Dichte

$$\rho = 2719 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{A.16})$$

Spezifische Wärmekapazität

$$c_p = 871 \text{ J/(kg K)} \quad (\text{A.17})$$

Wärmeleitung

$$\lambda = 202,40 \text{ W/(K m)} \quad (\text{A.18})$$

Emissionskoeffizient²

$$\epsilon = 0,20 \quad (\text{A.19})$$

A.4. Lackfilm

A.4.1. Wasser

Die Stoffdaten für Wasser wurden im Bereich von 0,01 °C bis 99,61 °C dem *VDI-Wärmeatlas* [105] entnommen und durch ein Polynom in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben.

$$Y = A + B1 \cdot T + B2 \cdot T^2 + B3 \cdot T^3 + B4 \cdot T^4 \quad (\text{A.20})$$

Die Koeffizienten für die einzelnen Stoffwerte sind nachfolgenden Tabellen A.3 und A.4 angegeben.

¹Es wird von KTL-beschichtetem Stahl mit vernachlässigbarer Schichtdicke ausgegangen.

²Die Kanalwände sind oxidiert.

	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg K)]	λ [W/(K m)]
A	$2,119032 \cdot 10^2$	$3,960018639 \cdot 10^4$	$-3,7762 \cdot 10^{-1}$
B1	6,96889	$-4,2213221 \cdot 10^2$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
B2	$-1,942 \cdot 10^{-2}$	1,88908	$8,43655 \cdot 10^{-7}$
B3	$1,6365 \cdot 10^{-5}$	$-3,77 \cdot 10^{-3}$	$-1,0653 \cdot 10^{-8}$
B4		$2,82423 \cdot 10^{-6}$	

Tabelle A.3.: Koeffizienten der Stoffwertpolynome für flüssiges Wasser I

	η [Pa s]	Δh_v [J/kg]	p_s [Pa]
A	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$3,56212 \cdot 10^6$	$-3,9678 \cdot 10^6$
B1	$-7,01914 \cdot 10^{-4}$	$-6,59620045 \cdot 10^3$	$4,06758681 \cdot 10^4$
B2	$1,97612 \cdot 10^{-6}$	$1,43798 \cdot 10^1$	$-1,393019 \cdot 10^2$
B3	$-1,86639 \cdot 10^{-9}$	$-1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,5948 \cdot 10^{-1}$

Tabelle A.4.: Koeffizienten der Stoffwertpolynome für flüssiges Wasser II

A.4.2. Butylglykol

Die im Nachfolgenden angegebenen Gleichungen für die Stoffeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur wurden der DIPPR-Stoffdatenbank [107] entnommen und gelten für den Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C.

Dichte

$$\rho = \bar{M}_{BG} \cdot \left(\frac{0,59126}{0,25043^{(1+(1-T/633,9)^{0,2682})}} \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{A.21})$$

Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda = 0,24599 - 2,7438 \cdot 10^{-4} \cdot T \left[\frac{\text{W}}{\text{K m}} \right] \quad (\text{A.22})$$

Spezifische Wärmekapazität

$$c_p = \frac{1}{\bar{M}_{BG}} \cdot (1,3308 \cdot 10^5 + 4,6839 \cdot 10^2 \cdot T) \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right] \quad (\text{A.23})$$

Verdampfungsenthalpie

$$h_v = \frac{1}{\bar{M}_{BG}} \cdot 7,5563 \cdot 10^7 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_k} \right)^{0,46028} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] \quad (\text{A.24})$$

Hierbei ist die kritische Temperatur für Butylglykol $T_k = 633,9\text{K}$.

Sättigungsdampfdruck

$$p_s = \exp \left(95,709 - \frac{9,7893 \cdot 10^3}{T} - 10,205 \cdot \ln(T) + 8,8492 \cdot 10^{-18} \cdot T^6 \right) [\text{Pa}] \quad (\text{A.25})$$

A.4.3. Polyurethan

Dichte

$$\rho = 1150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{A.26})$$

Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda = 0,2 \frac{\text{W}}{\text{K m}} \quad (\text{A.27})$$

Spez. Wärmekapazität

$$c_p = 1800 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \quad (\text{A.28})$$

A.4.4. Diffusionskoeffizienten

Skuhr [96] führte Messungen zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten einer Wasser-Butylglykol-Polyurethan Dispersion in einem Rohrlevitator durch. Dabei wurde eine Korrelation für die eingesetzten Modelllacke in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur der Komponenten ermittelt. Für Wasser und Butylglykol kann hierbei derselbe Gleichungsansatz verwendet werden. Es gilt:

$$D_{ii}(\xi_{PUR}, T) = (aT^b c^{\xi_{PUR}} + d \cdot \arctan(eT - f)(1 - \xi_{PUR})^g - h\xi_{PUR}) \cdot 10^{-11} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (\text{A.29})$$

Die Temperaturen sind hierbei in Kelvin einzusetzen. Für das verwendete ternäre Modelllacksystem gelten nachfolgende Koeffizienten:

a	b	c	d	e	f	g	h
$4,7606 \cdot 10^{-10}$	4,3258	$2,8155 \cdot 10^{-2}$	6,5535	1,9404	571	3,3023	0,9

Tabelle A.5.: Diffusionskoeffizienten im ternären Modelllacksystem

A.4.5. Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewicht

Für das Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewicht wurden Interaktionsparameter nach der Flory-Huggins-Theorie (Gleichung 4.58 und 4.59) ermittelt. Folgende konstante Parameter wurden verwendet:

$$\begin{aligned} \chi_{12} &= 0,4 \\ \chi_{13} &= -0,113 \\ \chi_{23} &= -4,0 \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

B. CFD-Solver FLUENT

Nachfolgende Tabelle B.1 beinhaltet stichwortartig die verwendeten Einstellungen des CFD-Solvers FLUENT¹. Tabelle B.2 zeigt die verwendeten Konvergenzkriterien.

Kategorie	Einstellung
Solver-Typ	Pressure-Based Stationär oder Transient kein Erdschwerefeld
Modelle	Energie Standard $k - \epsilon$ Turbulenzmodell mit „Enhanced Wall Treatment“ Strahlungs-DO-Model Species-Transport
Solver-Einstellungen	Pressure Velocity Coupling: SIMPLE räumliche Diskretisierung: 2. Ordnung Upwind für Dichte, Wasser, Butylglykol und Energie Transient: 2. Ordnung implizit bzw. 1. Ordnung implizit bei Rechnungsbeginn für die ersten Zeitschritte
Lösungseinstellungen	Relaxationsfaktoren: Standardwerte von ANSYS-FLUENT außer für Wasser und Butylglykol: 0,9; Energie: 0,99

Tabelle B.1.: CFD-Solvereinstellungen

Gleichung	Standard	Satz I	Satz II
Kontinuität	10^{-3}	10^{-14}	10^{-5}
x-Geschwindigkeit	10^{-3}	10^{-14}	10^{-5}
y-Geschwindigkeit	10^{-3}	10^{-14}	10^{-5}
z-Geschwindigkeit	10^{-3}	10^{-14}	10^{-5}
Energie	10^{-6}	10^{-14}	10^{-6}
turb. kinet. Energie k	10^{-3}	10^{-14}	10^{-5}
Dissipationsrate ϵ	10^{-3}	10^{-14}	10^{-5}
DO-Intensität	10^{-6}	10^{-14}	10^{-6}
Komponente H ₂ O	10^{-3}	10^{-14}	10^{-5}
Komponente BG	10^{-3}	10^{-14}	10^{-5}

Tabelle B.2.: Konvergenzkriterien

¹FLUENT, Firma ANSYS, Version 12.1

C. Struktogramm

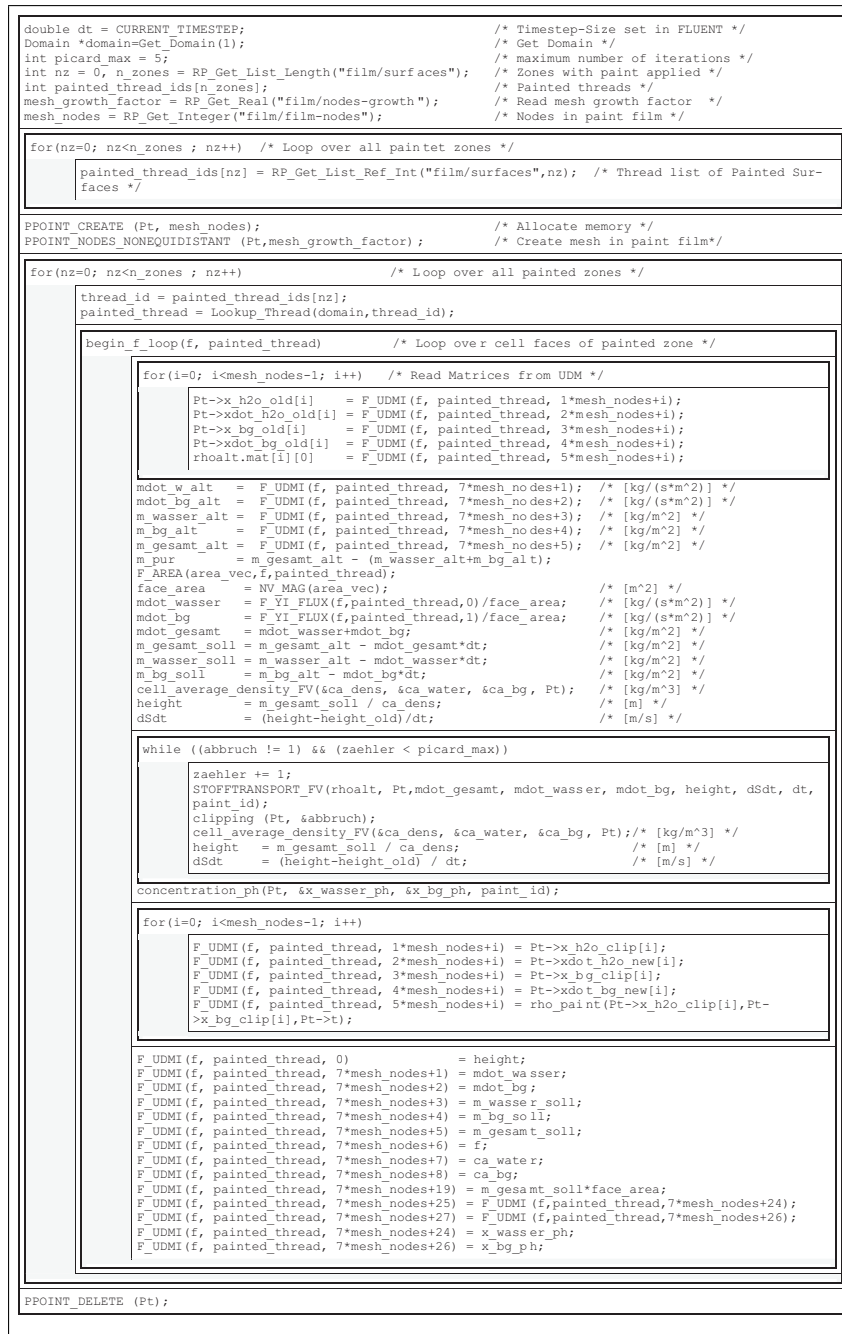


Abbildung C.1.: Nassi-Shneiderman-Diagramm des Trocknungsmodells

Literaturverzeichnis

- [1] ALSOY, SACIDE und J. LARRY DUDA: *Modeling of Multicomponent Drying of Polymer Films*. AIChE Journal, 45(4):896–905, April 1999.
- [2] ALSOY, SACIDE und J. LARRY DUDA: *Modeling of Multilayer Drying of Polymer Films*. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, 37:1665 – 1675, 1999.
- [3] ANSYS, INC., Darmstadt: *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, April 2009.
- [4] ANSYS, INC., Darmstadt: *ANSYS FLUENT 12.0 Users Guide*, April 2009.
- [5] ATHEY, ROBERT D.: *How do coatings actually dry?* European Coatings Journal, 9:623 – 627, 1995.
- [6] BELLINGHAUSEN, RAINER und CHRISTIAN BUDDE: *Auslegung von Trocknungsprozessen gestern und heute am Beispiel der Sprühtrocknung*. In: *ANSYS Conference & 27th CADFEM User's Meeting*, Dresden, 2009.
- [7] BÖHM, CHRISTOPH ANDREAS: *Wechselwirkung von Tropfen und Sprays newtonscher und nicht-newtonscher Fluide mit festen Oberflächen: Aufprall und Filmbildung*. Dissertation, SLA, Technische Universität Darmstadt, 2002.
- [8] BLANKE, CORNELIA: *Modellierung und numerische Simulation des Aufheizverhaltens von PKW-Bauteilen und -Karossen in Trocknern*. Dissertation, FNB, Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [9] BRINCKMANN, FELIX, STEPHAN HECHT und PETER STEPHAN: *Simulation of the drying process of paint films using FLUENT*. In: *ANSYS Conference & 25. CADFEM Users ' Meeting Proceedings*, Dresden, 2007.
- [10] BRINCKMANN, FELIX, THOMAS LEHNHÄUSER, RALF LÖFFLER und PETER STEPHAN: *Simulation of the heat and mass transfer during paint drying processes*. In: *ANSYS Conference & 27. CADFEM Users ' Meeting, Leipzig*, 2009.
- [11] BRINCKMANN, FELIX, ILLYA SHEVCHUK und PETER STEPHAN: *Thin film drying in a continuous belt-dryer using CFD*. In: *10th European Coating Symposium (ECS)*, Turku, 2011.
- [12] BRINCKMANN, FELIX und PETER STEPHAN: *Experimental investigation of the drying of water-based paints used in automotive industry*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 50:489 – 494, 2011.
- [13] CAIRNCROSS, RICHARD A. und CHRISTOPHER J. DURNING: *A model for drying of viscoelastic polymer coatings*. AIChE Journal, 42(9):2415 – 2425, 1996.

- [14] CAIRNCROSS, RICHARD A., LORRAINE F. FRANCIS und L. E. SCRIVEN: *Competing drying and reaction mechanisms in the formation of sol-to-gel films, fibres and spheres*. *Drying Technology*, 10(4):893 – 923, 1992.
- [15] COHEN, EDWARD D. und EDGAR B. GUTOFF (Herausgeber): *Modern Coating and Drying Technology*. Wiley - VCH, Weinheim, 1992.
- [16] CRÖSSMANN, FELIX: *Experimentelle Untersuchungen zum Trocknungsverhalten von Wasserbasislacksystemen*. Studienarbeit, Institut für Technische Thermodynamik, Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [17] CUSSLER, E.L.: *Diffusion: mass transfer in fluid systems*. Cambridge University Press, 2. Auflage, 1997.
- [18] CZAPUTA, KLAUS, GÜNTER BRENN und WALTER MEILE: *Concentration profiles in drying cylindrical filaments*. *Heat and Mass Transfer*, 45:227 – 238, 2008.
- [19] CZAPUTA, KLAUS, GÜNTER BRENN und WALTER MEILE: *Konzentrationsprofile in trocknenden flüssigen Beschichtungen auf kreiszylindrischen Substraten*. In: *Jahrestreffen der ProcessNet-Fachausschüsse Computational Fluid Dynamics und Wärme- und Stoffübertragung*. Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung, Graz, 2010.
- [20] CZAPUTA, KLAUS, GÜNTER BRENN und WALTER MEILE: *Konzentrationsprofile in trocknenden Flüssigkeitsschichten auf kreiszylindrischen Substraten*. *Chemie Ingenieur Technik*, 82(5):623 – 633, 2010.
- [21] DABRAL, MAHENDRA: *Solidification of coatings: theory and modell of drying, curing and microstructure growth*. Dissertation, University of Minnesota, April 1999.
- [22] DABRAL, MAHENDRA, L.F. FRANCIS und L. E. SCRIVEN: *Drying Process Paths of Ternary Polymer Solution Coatings*. *AIChE Journal*, 48(1):25 – 37, January 2002.
- [23] DIN 5167-1: *Durchflussmessung von Fluiden in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt*. Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [24] DIN EN ISO 28199-3: *Beschichtungsstoffe - Beurteilung applikationsbedingter Eigenschaften von Beschichtungssystemen - Teil 3: Visuelle Beurteilung von Ablaufneigung, Kocherbildung, Nadelstichbildung und Deckvermögen*. Beuth Verlag, Berlin, 1 2010.
- [25] DOLENC, JOHN W.: *Choose the Right Flow Meter*. *Chemical Engineering Progress*, 22, 1996.
- [26] DOMNICK, J., D. GRUSECK, K. PULLI, A. SCHEIBE und Q. YE: *Investigations of the Drying Process of a Water Based Paint Film for Automotive Applications*. In: *8th European Coating Symposium (ECS)*, Karlsruhe, 2009.
- [27] DOMNICK, J., D. GRUSECKA, K. PULLI, A. SCHEIBE, Q. YE und F. BRINCKMANN: *Investigations of the drying process of a water based paint film for automotive applications*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50:495 – 502, 2011.

- [28] DÖRING, DANIEL, FELIXINE SIEGMUNF, MARTIN RHEINFURTH, IGOR SOLODOV, GERHARD BUSSE und EDMUND HABERSTROH: *Air-coupled ultrasonic lamb waves for process monitoring*. In: *10th European Conference for Non-Destructive Testing*, 2010.
- [29] DURST, W. und A. SCHEIBE: *Energiearme Belüftung für die Flugzeuglackierung*. Technischer Bericht, besser lackieren! Jahrbuch 2009.
- [30] EVANS, P.L. ET AL.: *A Mathematical Model for Crater Defect Formation in a Drying Paint Layer*. Journal of Colloid Interface Science, No. 227:191 – 205, 2000.
- [31] FARKAS, I. und Z. RENDIK: *Block oriented modeling of drying processes*. Mathematics and Computers in Simulation, 42:213 – 219, 1996.
- [32] FAVRE, E., Q. T. NGUYEN, R. CLEMENT und J. NEEL: *Application of Flory-Huggins theory to ternary polymer-solvents equilibria: A case study*. European Polymer Journal, 32, Issue 3(3):303–309, 1996.
- [33] FULLER, E. N., P. D. SCHETTLER und J.C. GIDDINGS: *A new method for prediction of binary gas-phase diffusion coefficients*. Industrial and Engineering Chemistry, 58(5):18 – 27, 1966.
- [34] GAMBARYAN-ROISMAN, TATIANA: *Marangoni convection, evaporation and interface deformation in liquid films on heated substrates with non-uniform thermal conductivity*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53:390 – 402, 2010.
- [35] GEHRMANN, DIETRICH: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur konvektiven Trocknung dünner, ebener Gelatineschichten*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1979.
- [36] GEIPEL, CHRISTIAN: *Energie- und Stofftransport bei der Trocknung von Automobil-Basis- und Modelllacken*. Dissertation, TTD, Technische Universität Darmstadt, 2005.
- [37] GEIPEL, CHRISTIAN und PETER STEPHAN: *Experimental investigation of the drying process of automotive base paints*. Applied Thermal Engineering, 25:2578 – 2590, 2005.
- [38] GNIELINSKI, VOLKER, FRANZ THURNER und ALFONS MERSMANN: *Verdampfung, Kristallisation, Trocknung*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1999.
- [39] GOLDSCHMIDT, ARTUR und HANS-JOACHIM STREITBERGER: *BASF-Handbuch Lackiertechnik*. Vincentz Network, Hannover, 2002.
- [40] GORCE, J.-P., D. BOVEY, P.J. McDONALD, P. PALASZ, D. TAYLOR und J.L. KEDDIE: *Vertical water distribution during the drying of polymer films cast from aqueous emulsions*. The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics, 8(4):421 – 429, 2002.
- [41] HALLCREST, LCR: *Handbook of Thermochromatic Liquid Crystal Technology*. Technischer Bericht, Glenview, 1991.

- [42] HAMPE, MANFRED: *Skriptum Thermische Verfahrenstechnik*. Fachgebiet Thermische Verfahrenstechnik, Technische Universität Darmstadt, 2007.
- [43] HECHT, STEPHAN: *Dynamik von applizierten Lackfilmen*. Dissertation, SLA, Technische Universität Darmstadt, voraussichtlich 2010.
- [44] HECK, MARCUS: *Aufbau eines automatischen Lackierstandes zur Lackierung von Versuchsblechen*. Studienarbeit, Institut für Technische Thermodynamik, Technische Universität Darmstadt, 1999.
- [45] HEMMING, WERNER: *Verfahrenstechnik*. Vogel Buchverlag, 8. Auflage, 1999.
- [46] HÖHMANN, CHRISTOPH: *Temperaturmessverfahren zur räumlich hochauflösenden Untersuchung des Wärmetransports an einem verdampfenden Flüssigkeitsmeniskus*. Dissertation, TTD, Technische Universität Darmstadt, 2004.
- [47] HUGHES, THOMAS J.R.: *The finite element method*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA, 1987.
- [48] JANDEL, A.-S.: *Energiemanagement im Coil-Coating - Trocknungstechnologien im Vergleich*. Journal für Oberflächentechnik, 49(2):36 – 38, 2009.
- [49] KIIL, SØREN: *Drying of latex films and coatings: Reconsidering the fundamental mechanisms*. Progress in Organic Coatings, 57(3):236 – 250, 2006.
- [50] KLINKE, EUGEN, GABRIEL KUNZ und MICHAEL RÖSLER: *Meßplatz zur Infrarot-Trocknung von Wasserlacken*. Farbe & Lack, 99(4):327 – 331, 1993.
- [51] KNAPPE, STEPHAN: *Vernetzung verfolgen*. Farbe & Lack, 09:18 – 22, 2003.
- [52] KNORR, TILMAN, MARTIN SCHINDLER, EBERHARD AUST und KARL-HEINZ JACOB: *Berechnung von Dampf/Flüssig-Gleichgewichtsdaten binärer Gemische aus Dampfdruckdaten*. Chemie Ingenieur Technik, 81(12):1999 – 2006, 2009.
- [53] KO, HAN-BONG: *NMR und MRI an mechanisch beanspruchten Polyoxymethylenproben*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Chemie, 2005.
- [54] KRENN, J., P. SCHARFER, M. KIND und W. SCHABEL: *Drying of solvent-borne coatings with pre-loaded drying gas*. The European Physics Journal, 166(1):45 – 48, 2009.
- [55] KRENN, J., P. SCHARFER und W. SCHABEL: *Oberflächendeformation aufgrund von oberflächenspannungsgetriebenen Stoffströmen während der Prozessierung flüssig applizierter Polymerbeschichtungen*. In: *ProcessNet-Fachausschuss Wärme- und Stoffübertragung, Hamburg*, 2010.
- [56] KRENN, J., M. SOJKA, P. SCHARFER, M. KIND und W. SCHABEL: *Surface structures during thin film-drying caused by Marangoni convection*. In: *14th International Coating Science and Technology Symposium*, Marina del Rey CA, USA, 2008.
- [57] KRISCHER, O. und W. KAST: *Trocknungstechnik*. Springer-Verlag, 2. Auflage, 1987.

- [58] KRÖLL, K.: *Trocknungstechnik, Zweiter Band*. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1978.
- [59] KUNKEL, MATTHIAS und JOCHEN SCHULZE: *Noncontact measurement of central lens thickness*. Glass Science and Technology, 78(5):245 – 247, 2005.
- [60] LEWIS, GILBERT NEWTON: *Thermodynamics*. 1961.
- [61] LÖFFLER, RALF: *Drying Simulation of Car Bodies Part II: CFD*. In: *5th International VirtualPaintShop Users' Meeting*, Dresden, 2009.
- [62] McDONALD, PETER J. und JOSEPH L. KEDDIE: *Watching paint dry: Magnetic resonance imaging of soft condensed matter*. Europhysics News, 33:48 – 51, 2002.
- [63] MESCHKE, DIETER (Herausgeber): *Gerthsen Physik*. Springer-Verlag, Berlin, 23. Auflage, 2006.
- [64] MINTZLAFF, J.: *Determination of properties for the calculation of aqueous thin film drying*. Heat and Mass Transfer, 37(6):617 – 622, 2001.
- [65] MINTZLAFF, JOHANNES: *Trocknungsmechanismen bei der Dispersionslackierung*. Dissertation, Technische Universität München, 1999.
- [66] MINTZLAFF, JOHANNES und FRANZ MAYINGER: *Trocknungsmechanismen bei der Dispersionslackierung*. Chemie Ingenieur Technik, 70(9):1105 – 1106, 1998.
- [67] MINTZLAFF, JOHANNES und FRANZ MAYINGER: *Konvektive Dünnschichttrocknung: Trocknungsmechanismen bei der Dispersionslackierung*. Chemie Ingenieur Technik, 72(6):605 – 609, 2000.
- [68] MISCHKE, PETER: *Filmbildung in modernen Lacksystemen*. Vincentz Network, Hannover, 2007.
- [69] MOHN, JOACHIM, RENE GÄLLI und LUKAS EMMENEGGER: *Echtzeitmessung reaktiver Prozessgase in der Mikroelektronik mittels FTIR Spektroskopie*. Chemie Ingenieur Technik, 78(10):1524 – 1530, 2006.
- [70] OERTEL, HERBERT: *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre - Grundlagen und Phänomene*, Band 12. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [71] ONDRATSCHEK, DIETER, MATTHIAS SCHNEIDER und HARALD VOGELSANG: *Forcierung des Wasserlackeinsatzes durch neue Trocknungsverfahren*, 2001.
- [72] PISTNER, MATTHIAS: *Experimentelle Untersuchungen zum Trocknungsverhalten eines Wasserbasis-Modelllacksystems unter definierten Strömungsbedingungen*. Bachelor-Thesis, Institut für Technische Thermodynamik, Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [73] POPPNER, MARC: *Modellierung und Simulation der Lackierung von PKW-Karosserien mit bewegten, elektrostatisch unterstützten Hochrotationszerstäubern*. Dissertation, SLA, Technische Universität Darmstadt, 2007.

- [74] REGIER, MARC: *Temperatur- und Wasserverteilung bei der konvektiven Trocknung mittels Inline-Magnetresonanztomographie*. Chemie Ingenieur Technik, 78(8):1112 – 1115, 2006.
- [75] REID, ROBERT C. und THOMAS K. SHERWOOD: *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw-Hill Book Company, New York, Second Edition Auflage, 1966.
- [76] RIEDE, TH. und E. U. SCHLÜNDER: *Selective Evaporation of a Ternary Mixture Containing One Non-volatile Component*. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Chemical Engineering*, Seiten 498 – 509, Kanpur, India, 1989. McGraw-Hill, New York.
- [77] RIEDE, THOMAS und ERNST ULRICH SCHLÜNDER: *Evaporation and Pervaporation of a Binary Mixture from an Inert Carrier Liquid*. Chemical Engineering & Technology, 11:384 – 391, 1988.
- [78] RIEDE, THOMAS und ERNST ULRICH SCHLÜNDER: *Selective Evaporation of a Ternary Mixture Containing One Nonvolatile Component with Regard to Drying Processes*. Chemical Engineering and Processing, 28:151 – 163, 1990.
- [79] ROUTH, ALEXANDER F. und WILLIAM B. RUSSEL: *Horizontal Drying Evaporation Fronts During Solvent Evaporation from Latex Films*. AIChE Journal, 44(9):2088 – 2098, 1998.
- [80] ROUTH, ALEXANDER F. und WILLIAM B. RUSSEL: *A Process Model for Latex Film Formation: Limiting Regimes for Individual Driving Forces*. American Chemical Society, 15:7762 – 7773, 1999.
- [81] RÖSLER, MICHAEL, EUGEN KLINKE, GABRIEL KUNZ und WERNER ALDINGER: *Untersuchungen zur Abdunstkinetik von Lösemitteln unter IR-Bestrahlung*. Farbe & Lack, 99(10):844 – 849, 1993.
- [82] SARIC, SANJIN: *Turbulent Flow Separation Control by Boundary-layer Forcing: A Computational Study*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2006.
- [83] SAUER, MARKUS: *Numerische Simulation der Trocknung von Lacken auf einer Flugzeugaußenhaut unter definierten Trocknungsbedingungen*. Bachelor-Thesis, Institut für Technische Thermodynamik, Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [84] SAURE, R., G.R. WAGNER und E.-U. SCHLÜNDER: *Drying of solvent-borne polymeric coatings: I. Modeling the drying process*. Surface and Coatings Technology, 99:253 – 256, 1998.
- [85] SAURE, R., G.R. WAGNER und E.-U. SCHLÜNDER: *Drying of solvent-borne polymeric coatings: II. Experimental results using FTIR spectroscopy*. Surface and Coatings Technology, 99:257 – 265, 1998.
- [86] SCHABEL, WILHELM: *Inverse Mikro-Raman-Spektroskopie - Eine neue Messmethode zur Untersuchung lokaler Stofftransportvorgänge in dünnen Filmen, Folien und Membranen*. Chemie Ingenieur Technik, 77(12):1915 – 1926, 2005.

-
- [87] SCHABEL, WILHELM, PHILIP SCHARFER, MAX MÜLLER, IMKE LUDWIG und MATTHIAS KIND: *Messung und Simulation von Konzentrationsprofilen bei der Trocknung binärer Polymerlösungen*. Chemie Ingenieur Technik, 75(9):1336 – 1344, 2003.
- [88] SCHEIBE, ANDREAS: *Vorhabensbeschreibung zum Forschungsantrag: Simulation der instationären Lacktrocknung bei dreidimensionalen Objekten*, 2006.
- [89] SCHEIBE, ANDREAS: *Ergebnisse und Nutzen des Forschungsprojektes SiLat*. In: 17. DFO Automobil Tagung, Wiesbaden, 2010.
- [90] SCHEIBE, ANDREAS: *Simulation der instationären Lacktrocknung bei dreidimensionalen Objekten - Abschlussbericht*, 2010.
- [91] SCHLÜNDER, ERNST-ULRICH: *Einführung in die Stoffübertragung*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1984.
- [92] SCHMIDT, SEBASTIAN: *Inbetriebnahme eines Prallströmkanals zur experimentellen Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Wasserbasislacksystemen*. Bachelor-Thesis, Institut für Technische Thermodynamik, Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [93] SCHRÖDER, MARKUS: *Untersuchungen zum Trocknungsvorgang bei nass-in-nass applizierten Lackschichten*. Dissertation, TTD, Technische Universität Darmstadt, 2002.
- [94] SCHÜRMANN, HELMUT: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer-Verlag Berlin, 2007.
- [95] SCHWARZBACH, J., M. NILLES und E. U. SCHLÜNDER: *Microconvection in Porous Media during Pervaporation of a Liquid Mixture*. Chemical Engineering and Processing, 22:163 – 175, 1987.
- [96] SCKUHR, SEBASTIAN: *Simulation des thermodynamischen Verhaltens von Lackpartikeln bei der Spritzapplikation*. Dissertation, TTD, Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [97] SHERWOOD, T.K., R.L. PIGFORD und C.R. WILKE: *Mass Transfer*. McGraw-Hill, New York, 1975.
- [98] SHEVCHUK, ILLYA: *Erweiterung einer Laboranlage für die experimentelle Betrachtung von Lacktrocknungsvorgängen bei Prallanströmung*. Studienarbeit, Institut für Technische Thermodynamik, Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [99] SPARROW, E.M. und R.D. CESS: *Radiation Heat Transfer*. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 1970.
- [100] SPURK, JOSEPH H. und NURI AKSEL: *Strömungslehre: Einführung in die Theorie der Strömungen*. Springer-Verlag Berlin, 7. Auflage, 2007.
- [101] STEINBECK-BEHRENS, CORD: *Drying Simulation of Car Bodies Part I: VPS/DRY*. In: 5th International VirtualPaintShop Users' Meeting, Dresden, 2009.

-
- [102] STEPHAN, PETER: *Skriptum zur Vorlesung 'Höhere Wärmeübertragung'*. Fachgebiet Technische Thermodynamik, Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [103] STEPHAN, PETER, KARLHEINZ SCHABER, KARL STEPHAN und FRANZ MAYINGER: *Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen 2: Mehrstoffsysteme und chemische Reaktionen*. Springer-Verlag Berlin, 2010.
- [104] VARGAFTIK, N.B.: *Handbook of physical properties of liquids and gases: pure substances and mixtures*. Nauka Press, Moscow, 2. Auflage, 1983.
- [105] VDI VERLAG-GESELLSCHAFT (Herausgeber): *VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. Springer-Verlag Berlin, 9. Auflage, 2002.
- [106] VRENTAS, J. S. und C. M. VRENTAS: *Drying of solvent-coated polymer films*. Journal of Polymer Science, 32(1):187 – 194, 1993.
- [107] YANG, Y. ET AL.: *BUY-DIPPR Thermophysical Properties Laboratory, Project 801, Evaluated Process Design Data*. Provo, USA, 2007.
- [108] YE, Q., K. PULLI, A. SCHEIBE, J. DOMNICK und D. GRUSECK: *Numerical and experimental study of convective heat transfer with complicated turbulent flow in a laboratory dryer for turbulence model assessment*. In: *6th International Conference on Heat Transfer, Fluid Dynamics and Thermodynamics*, Nummer YQ1 in *HEFAT2008*, Pretoria, South Africa, 2008.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Geburtsdatum	18.10.1979
Geburtsort	Bayreuth
Familienstand	ledig

Schulbildung

1986 - 1990	Volksschule, Bayreuth
1987 - 1988	Volksschule, Bad Kissingen
1988 - 1990	Grundschule, Ingolstadt
1990 - 1992	Christoph-Scheiner-Gymnasium, Ingolstadt
1992 - 1999	Viktoriaschule, Darmstadt (Abitur)

Zivildienst

07/1999 - 07/2000	Seniorenzentrum Heimathaus Darmstadt
-------------------	--------------------------------------

Studium

10/2000 - 9/2004	Grundstudium allgemeiner Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt
9/2002	Abschluss der Diplom-Vorprüfung
10/2002 - 9/2006	Hauptstudium allgemeiner Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt
4/2004 - 7/2004	Praktikum in der F&E Abteilung der Meyerwerft, Papenburg
8/2004 - 2/2005	Stagiere im Mechanical Department, Testing Division, der European Space Agency, Noordwijk, Niederlande
4/2006 - 9/2006	Diplomarbeit am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, Technische Universität Darmstadt
9/2006	Abschluss der Diplom-Hauptprüfung (Dipl.-Ing.) an der Technischen Universität Darmstadt

Berufliche Tätigkeit

seit 10/2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Technische Thermodynamik an der Technischen Universität Darmstadt
--------------	--